

TUGAS AKHIR - TE 141599

**ALIRAN DAYA OPTIMAL DENGAN BATAS KEAMANAN
UNTUK SISTEM KALIMANTAN SELATAN DAN TENGAH**

Aden Riangga
NRP 07111440000033

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, S.T., M.T.
Dr. Ir. Ni Ketut Aryani, MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



TUGAS AKHIR - TE 141599

**ALIRAN DAYA OPTIMAL DENGAN BATAS KEAMANAN
UNTUK SISTEM KALIMANTAN SELATAN DAN TENGAH**

Aden Riangga
NRP 07111440000033

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, S.T., M.T.
Dr. Ir. Ni Ketut Aryani, MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



ITS

Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

Security Constrained Optimal Power Flow for South and Middle Kalimantan System

Aden Riangga
NRP 07111440000033

Supervisors
Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, S.T., M.T.
Dr. Ir. Ni Ketut Aryani, MT.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2018

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan “**Aliran Daya Optimal dengan Batas Keamanan untuk Sistem Kalimantan Selatan dan Tengah**” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 27 Mei 2018

Aden Riangga
NRP 07111440000033

**ALIRAN DAYA OPTIMAL DENGAN BATAS KEAMANAN
UNTUK SISTEM KALIMANTAN SELATAN DAN TENGAH**

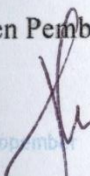
TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada**

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

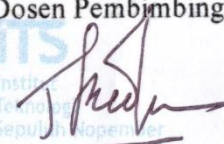
Menyetujui:

Dosen Pembimbing I



Dr. Rony Seto Wibowo, S.T., M.T
NIP. 1974 11 29 2000 12 1001

Dosen Pembimbing II



Dr. Ir. Ni Ketut Aryani, MT.
NIP. 1965 09 01 1991 03 2002



Aliran Daya Optimal dengan Batas Keamanan untuk Sistem Kalimantan Selatan dan Tengah

Nama Mahasiswa : Aden Riangga
NRP : 07111440000033
Pembimbing I : Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, S.T., M.T.
NIP : 197411292000121001
Pembimbing II : Ir. Ni Ketut Aryani, MT.
NIP : 196509011991032002

ABSTRAK

Pada tahun 2016, Rasio elektrifikasi Kalimantan rata-rata hanya mencapai 84,87%, sehingga tahun ini Perusahaan Listrik Negara (PLN) merencanakan untuk melakukan pengembangan, salah satunya di Kalimantan Selatan dan Tengah (Barito). Dalam melakukan perencanaan sistem kelistrikan, salah satu kriteria yang harus dipenuhi adalah *security* yang dapat dilakukan dengan pendekatan berupa *Security Constrained Optimal Power Flow (SCOPF)*, sebuah pengembangan dari *OPF* yang dapat menyesuaikan pengaturan pada kondisi normal maupun sebelum terjadinya kontingensi untuk mencegah pelanggaran pada batasan yang ditentukan setelah terjadinya kontingensi. Metode penyelesaian dilakukan dengan melakukan perhitungan menggunakan *sequential quadratic programming* pada *software Matpower* dengan analisa *ACOPF*. Berdasarkan hasil simulasi, dengan kondisi beban baik tahun 2018 maupun tahun 2028, terbukti bahwa *sequential quadratic programming* mampu menyelesaikan permasalahan *AC-SCOPF* pada Barito tanpa melanggar batasan *ramp rate*, kapasitas saluran dan batasan lainnya. Perubahan daya yang besar antara kondisi normal dan kontingensi dapat diatasi dengan adanya pembangkit pada daerah Bangkanai sebagai *peaker* tanpa adanya *re-dispatch* pada kondisi normal dikarenakan kapasitas saluran yang besar dan beban yang kecil pada sistem Kalimantan Selatan dan Tengah.

Kata kunci: *ACOPF, Kalimantan, Security Constrained, Sequential Quadratic Programming*

Halaman ini sengaja dikosongkan

Security Constrained Optimal Power Flow for Middle and South Kalimantan System

Nama Mahasiswa : Aden Riangga
NRP : 07111440000033
Supervisor I : Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, S.T., M.T.
NIP : 197411292000121001
Supervisor II : Ir. Ni Ketut Aryani, MT.
NIP : 196509011991032002

ABSTRACT

In 2016, electrification ratio of Kalimantan only reached 84.87%, this year Perusahaan Listrik Nega (PLN) plans to develop, one of them in Middle and South Kalimantan (Barito). In planning of electrical systems, one of the criteria that must be fulfilled is security, which can be approached with Optimal Power Flow (SCOPF), a development of the OPF that can adjust the settings under normal conditions or before the occurrence of contingencies to prevent violations within the specified constraint after contingency conditions. The method is performed by performing calculations using sequential quadratic programming on Matpower software with ACOPF analysis. Based on the results, with load conditions both in 2018 dan 2028, it is proven that sequential quadratic programming is able to solve the AC-SCOPF problem in Barito without violating the limits of ramp rate, line capacity, and other constraints. Major power changes between normal and contingency condition can be overcome by generating at Bangkanai area as a peaker without any re-dispatch under normal conditions due to large line capacity and small load in South and Middle Kalimantan systems.

Keywords: ACOPF, Kalimantan, Security Constrained, Sequential Quadratic Programming

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas segala berkat dan rahmat-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan penelitian ini sebagai tugas akhir untuk menyelesaikan jenjang studi S1 pada bidang studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Besar harapan penulis agar tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca, khususnya mahasiswa Teknik Elektro untuk ke depannya dan dapat diterapkan dengan nyata.

Dalam menyelesaikan tugas akhir ini saya mengucapkan terimakasih atas segala bantuan, bimbingan, cinta dan dukungan yang telah diberikan, kepada:

1. Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat, karunia, hidayah dan segala-Nya.
2. Ayah, ibu yang tetap percaya dan selalu mendoakan.
3. Dr. Rony Seto Wibowo ST., MT., selaku Dosen Pembimbing I Tugas Akhir Ir. Ni Ketut Aryani, MT, selaku Dosen Pembimbing II Tugas Akhir yang telah memberikan arahan, saran serta bimbingan selama pengerjaan tugas akhir dan selama perkuliahan di Teknik Elektro.
4. Prof. Ontoseno Penangsang, Prof. Adi Soeprijanto, Bapak Dimas Fajar Uman, Bapak Suyanto, serta dosen-dosen Teknik Elektro ITS yang telah memberikan banyak masukan dan pengetahuan kepada penulis.
5. Rekan-rekan asisten Laboratorium Simulasi Sistem Tenaga Listrik, Amirul, Rizki, Ori, Mila, Fikri, Sabil, Mas Esa dan Mas Rinthon serta teman-teman trainee.
6. Mas Nurdin dan Mbak Santi, Agung dan Qori atas waktu, dukungan, cerita serta bimbingannya.
7. Teman-teman W303, Fauzan, Guntur, Januardi, Akhid, Stanley, Faldy, Zaky atas hiburan dan dukungannya.
8. Teman teman E54, atas segala suka dan duka. *E54 Fight Fight Fight, Hidup Elektro ITS!*
9. Teman-teman di Departemen Kominfo Himatektro, Inasdiyah Farras Fauziyyah, Irul, Ojan, Nobel, Imam, Rangga, Keke, Vipril, Dandi, Danial, Bagus.
10. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu, dengan tanpa mengurangi rasa terimakasih penulis.

Dalam menyusun tugas akhir ini, penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran dari pembaca sangat diharapkan untuk pengembangan penelitian dan ilmu pengetahuan.

Surabaya, Mei 2018

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
PERNYATAAN KEASLIAN	iii
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xix
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan	3
1.5 Metode Penelitian	3
1.6 Sistematika Penulisan	4
1.7 Relevansi	5
BAB 2 ALIRAN DAYA OPTIMAL DENGAN BATAS KEAMANAN	7
2.1 Sistem Tenaga Listrik	7
2.2 Keamanan Sistem Tenaga	8
2.3 Optimal Power Flow	8
2.4 Persamaan Matematis Aliran Daya Optimal Arus Bolak Balik ..	9
2.5 Dynamic Optimal Power Flow (DOPF)	11
2.6 DOPF dengan batas keamanan sistem	13

BAB 3 PENERAPAN SEQUENTIAL QUADRATIC PROGRAMMING DALAM ALIRAN DAYA OPTIMAL DENGAN MEMPERTIMBANGKAN BATAS KEAMANAN	15
3.1 Algoritma	15
3.2 Sequential Quadratic Programming pada Matlab	16
3.3 Penerapan Sequential Quadratic Programming dalam OPF	21
3.3.1 Inisialisasi Permasalahan DOPF.....	21
3.3.2 AC-DOPF Pada Sequential Quadratic Programming	23
3.3.2.1 Inisialisasi X_0 Sebagai Variabel Kontrol Awal	23
3.3.2.2 Awal Pembentukan Fungsi Objektif	23
3.3.2.3 Pembentukan Equality Constraint	25
3.3.2.4 Pembentukan Inequality Constraint	26
3.3.2.5 Permodelan Batas Atas dan Bawah	28
3.4 Sistem Kelistrikan Kalimantan Selatan dan Tengah	30
3.4.1 Data Pembangkit Kalimantan Selatan dan Tengah	30
3.4.2 Data Gardu Induk Kalimantan Selatan dan Tengah	30
3.4.3 Data Saluran Kalimantan Selatan dan Tengah	30
BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS	35
4.1 Simulasi Sistem IEEE 9 Bus	35
4.1.1 Validasi Tahap 1	36
4.1.1.1 Simulasi Validasi Tahap 1	36
4.1.1.2 Analisis Validasi Tahap 1	37
4.1.2 Validasi Tahap 2	38
4.1.2.1 Simulasi Validasi Tahap 2	38
4.1.2.2 Simulasi Validasi Tahap 2	39
4.1.3 Validasi Tahap 3	39

4.1.3.1	Analisis Kontingensi Sistem IEEE 9 Bus	40
4.1.3.2	Simulasi Validasi Tahap 3	41
4.1.3.3	Analisis Validasi Tahap 3	43
4.2	Pengujian <i>AC-SCOPF</i> Kalimantan Selatan dan Tengah	44
4.2.1	Analisis Kontingensi Kalimantan Selatan dan Tengah....	44
4.2.2	Simulasi <i>AC-SCOPF</i> Kalimantan Selatan dan Tengah ...	44
4.2.3	Analisis <i>AC-SCOPF</i> pada Sistem Barito	49
BAB 5 PENUTUP		54
5.1	Kesimpulan	55
5.2	Saran	55
DAFTAR PUSTAKA		57
LAMPIRAN		59
RIWAYAT HIDUP PENULIS.....		60

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Sistem tenaga listrik	8
Gambar 3. 1 Diagram alir penyelesaian tugas akhir	15
Gambar 3. 2 <i>Single line diagram</i> Barito 2018	31
Gambar 4. 1 <i>Single line diagram</i> sistem IEEE 9 bus	40
Gambar 4. 2 Biaya pembangkitan tiap jam pada kondisi normal	41

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1	Data pembangkit Barito	31
Tabel 3. 2	Fungsi pembangkitan dan ramp rate pembangkit Barito	32
Tabel 3. 3	Data gardu induk Barito	32
Tabel 3. 4	Data saluran Barito	33
Tabel 4. 1	Data Pembangkit Sistem Modifikasi IEEE 9 bus	35
Tabel 4. 2	Data Saluran Sistem Modifikasi IEEE 9 bus	35
Tabel 4. 3	Data Beban Sistem Modifikasi IEEE 9 bus	36
Tabel 4. 4	Hasil variabel output pada simulasi validasi tahap 1	37
Tabel 4. 5	Profil beban simulasi validasi tahap 2	38
Tabel 4. 6	Biaya total pembangkitan validasi tahap 2	38
Tabel 4. 7	Pembangkitan tanpa batasan <i>ramp rate</i> validasi tahap 2	38
Tabel 4. 8	Pembangkitan dengan batasan <i>ramp rate</i> validasi tahap 2	38
Tabel 4. 9	Perubahan daya pembangkitan validasi tahap 2	39
Tabel 4. 10	Perubahan daya pembangkitan validasi tahap 2	39
Tabel 4. 11	Daftar dampak kontingensi Sistem IEEE 9 Bus	40
Tabel 4. 12	Profil beban simulasi validasi tahap 3	41
Tabel 4. 13	Biaya total pembangkitan validasi tahap 3	41
Tabel 4. 14	Daya pembangkitan kondisi normal validasi tahap 3	41
Tabel 4. 15	Daya pembangkitan kondisi kontingensi validasi tahap 3	42
Tabel 4. 16	Perbandingan daya pembangkitan validasi tahap 3	42
Tabel 4. 17	Perubahan daya pembangkitan validasi tahap 3	42
Tabel 4. 18	Aliran daya kondisi normal jam ke-4 validasi tahap 3	42
Tabel 4. 19	Aliran daya kondisi kontingensi jam ke-4 validasi tahap 3	43
Tabel 4. 20	Daftar dampak kontingensi Sistem Barito	45
Tabel 4. 21	Biaya total pembangkitan Barito	45
Tabel 4. 22	Perubahan daya pembangkitan Barito	46
Tabel 4. 23	Aliran daya saluran kondisi normal Barito	46
Tabel 4. 24	Aliran daya saluran kondisi kontingensi Barito	47
Tabel 4. 25	Biaya total pembangkitan Barito tahap 2	50
Tabel 4. 26	Perubahan daya pembangkitan Barito tahap 2	50
Tabel 4. 27	Aliran daya saluran kondisi normal Barito tahap 2	50
Tabel 4. 28	Aliran daya saluran kondisi kontingensi Barito tahap 2	52

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada tahun 2016, rasio elektrifikasi Kalimantan rata-rata hanya mencapai 84,87% [1], sehingga tahun ini PLN merencanakan untuk melakukan perencanaan pengembangan sistem kelistrikan di Regional Kalimantan, salah satunya adalah sistem kelistrikan Kalimantan Selatan dan Tengah [2]. Dalam melakukan perencanaan tersebut, ada beberapa kriteria yang harus dipenuhi, diantaranya adalah *security*, *quality*, dan *economy* [3]. *Security* adalah kemampuan sistem dalam menghadapi gangguan tanpa mengakibatkan pemadaman. *Quality* adalah kemampuan sistem dalam beroperasi sesuai dengan batas operasi dan standar yang ditentukan. *Economy* adalah bagaimana caranya untuk mengoptimalkan sistem agar dapat beroperasi dengan biaya yang murah dengan memperhatikan keandalan dan kualitas sistem.

Pengembangan sistem kelistrikan diikuti dengan kebutuhan listrik yang meningkat, menurut data statistik ketenagalistrikan tahun 2015, penjualan tenaga listrik PLN tahun 2015 naik sebesar 2,13% jika dibanding tahun 2014. Kemudian jumlah pelanggan tahun 2015 naik sebesar 6,39%. Peningkatan kebutuhan listrik sendiri dapat menimbulkan kontingensi seperti *transmission line outage* dan *generator outage* yang memungkinkan terjadinya *load shedding* dengan harga yang tinggi, terlebih lagi kontingensi tersebut dapat menyebabkan terjadinya jatuh tegangan. Pada [4], dijelaskan bahwa dalam menjaga sistem tetap handal ketika terjadi gangguan dapat dilakukan dengan melakukan *power dispatch* dalam kondisi normal dengan mempertimbangkan kondisi kontingensi secara bertahap untuk memastikan bahwa kondisi kontingensi tersebut dapat memenuhi segala batasan. Tapi, dengan mempertimbangkan kondisi kontingensi setelah dilakukannya analisa kondisi normal akan merubah *dispatch* yang berakibat dalam meningkatnya biaya operasi. Pada penelitian ini akan dilakukan pendekatan yang dapat menyelesaikan kondisi normal dan kontingensi secara bersamaan melalui *Security Constrained Optimal Power Flow (SCOPF)* [5]. *Optimal Power Flow (OPF)* merupakan pengembangan dari *economic dispatch* dengan mempertimbangkan batasan aliran daya [6]. *SCOPF* sendiri adalah pengembangan dari *OPF* dengan mempertimbangkan kondisi kontingensi di dalam formulanya dengan

batasan *ramp rate* dari generator digunakan sebagai penghubung antara kondisi normal dan kontingensi. *SCOPF* dapat menyesuaikan pengaturan pada kondisi normal maupun sebelum terjadinya kontingensi untuk mencegah pelanggaran pada batasan yang ditentukan ketika kondisi normal dan kontingensi.

Analisa *SCOPF* dapat diselesaikan melalui proses iterasi, salah satu metode yang dapat digunakan adalah *Sequential Quadratic Programming (SQP)*. *SQP* adalah teknik untuk melakukan optimisasi *non-linier* [7]. Pada Matlab terdapat salah satu *M-files* yang telah dikembangkan untuk menyelesaikan permasalahan *OPF*. *Fmincon*, salah satu *M-file* dari *matpower* yang dapat digunakan untuk perhitungan *ACOPF* dengan metode *sequential quadratic programming*.

Analisa aliran daya optimal dapat melalui bentuk *DC* maupun *AC*. Untuk sistem interkoneksi besar, hasil dari perhitungan *DCOPF* dinilai kurang akurat, tetapi memiliki kelebihan sendiri dari segi penyederhanaan dan perhitungan yang cepat. Karena tingkat akurasi perhitungan akan mempengaruhi nilai ekonomis, diperlukan analisa berdasarkan *ACOPF* [8]. Meskipun model jaringan *AC* lebih rumit dalam penyelesaian optimisasi, tapi permodelan *AC* akan menggambarkan karakter jaringan yang lebih nyata melalui permodelan *losses*, perubahan tegangan yang selanjutnya dapat menawarkan manajemen risiko dan bagaimana cara memenuhi persyaratan dalam memenuhi pendapatan.

1.2 Permasalahan

Berdasarkan uraian latar belakang di atas, dapat dirumuskan permasalahan sebagai berikut:

1. Bagaimana mengimplementasikan metode *sequential quadratic programming* untuk perhitungan *ACOPF* dengan batas keamanan.
2. Bagaimana menentukan pembebanan optimal pembangkit untuk memenuhi kebutuhan beban tanpa melanggar batasan yang ditentukan dengan memperhitungkan kondisi kontingensi.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Semua pembangkit diasumsikan selalu beroperasi dalam keadaan menyala dan ideal.
2. Nilai *Ramp up* dan *Ramp down* pembangkit memiliki nilai sama besar.

3. Simulasi dilakukan dengan menggunakan *software Matpower*.
4. Metode yang dipakai untuk menyelesaikan permasalahan adalah *sequential quadratic programming*.
5. Efisiensi masing-masing pembangkit diasumsikan 100%.
6. Sistem yang digunakan adalah sistem kelistrikan Kalimantan Selatan dan Tengah tahun 2018.
7. Impedansi saluran hanya didasarkan pada konduktansi saluran, mengabaikan konfigurasi tower dan tipe konfigurasi saluran.

1.4 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Megimplementasikan metode *sequential quadratic programming* untuk perhitungan *ACOPF* dengan batas keamanan.
2. Mendapatkan pembebanan optimal pembangkit untuk memenuhi kebutuhan beban tanpa melanggar batasan yang ditentukan dengan memperhitungkan kondisi kontingensi.

1.5 Metode Penelitian

Berikut adalah tahapan dalam pengerjaan tugas akhir ini;

1. Studi literatur
Studi literatur dilakukan berdasarkan jurnal, prosiding dan text book yang berisi mengenai teori pendukung mengenai *AC power flow*, *ACOPF*, *SCOPF*, karakteristik saluran, *ramp rate* pembangkit, dan penggunaan metode *sequential quadratic programming* pada *matpower*.
2. Pengumpulan data
Pengumpulan data didapat dari RUPTL dan beberapa sumber lainnya. Data yang dibutuhkan berupa data generator, data saluran, dan data beban. Data generator berupa *cost function*, daya pembangkitan maksimum dan minimum serta *ramp rate* pembangkit. Data saluran berupa data impedansi, jarak dan kapasitas saluran.
3. Pembuatan program *M-file*
Pembuatan program *M-file* pada *matpower* berupa penerapan *SCOPF* dengan batasan yang telah ditentukan, diikuti dengan pembuatan matrik khusus untuk analisa AC.

4. Simulasi dan analisis

Simulasi diawali dengan tahap validasi menggunakan sistem IEEE 9 bus dengan memberikan batasan secara bertahap, dimulai dari tanpa batasan, dilanjutkan dengan menggunakan batasan *ramp rate* dan akhirnya memodelkan simulasi dengan kontingensi. Dilanjutkan simulasi pada sistem Barito yang kemudian dianalisis untuk mengetahui pengaruh batasan terhadap pembangkitan daya dan total biaya pembangkitan.

5. Penyusunan laporan

Hasil analisa dan kesimpulan dari penelitian ini dilaporkan dalam bentuk laporan tugas akhir sebagai jawaban dari perumusan masalah dan tujuan tugas akhir. Selain itu ditambahkan saran dan rekomendasi untuk pengembangan selanjutnya.

1.6 Sistematika Penulisan

Laporan tugas akhir ini disusun berdasarkan sistematika sebagai berikut:

BAB I	PENDAHULUAN Bab ini membahas mengenai latar belakang, permasalahan, batasan masalah, metode penelitian, tujuan dan relevansi dari penelitian.
BAB II	ALIRAN DAYA OPTIMAL DENGAN BATAS KEAMANAN Bab ini berisi mengenai dasar teori yang berkaitan dengan <i>optimal power flow</i> , dan <i>security constrained optimal power flow</i> beserta pengantar dari <i>sequential quadratic programming</i> .
BAB III	PENERAPAN SEQUENTIAL QUADRATIC PROGRAMMING DALAM ALIRAN DAYA OPTIMAL DENGAN MEMPERTIMBANGKAN BATAS KEAMANAN Bab ini berisi tentang permodelan aliran daya optimal AC dengan batas keamanan dalam <i>sequential quadratic programming</i> pada <i>Matpower software</i> dan sistem kelistrikan Kalimantan Selatan dan Tengah
BAB IV	SIMULASI DAN ANALISIS Bab ini berisi hasil dari simulasi aliran daya optimal mempertimbangkan batas keamanan sistem

menggunakan *sequential quadratic programming* pada sistem kelistrikan Kalimantan Selatan dan Tengah.

BAB V

PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan dan saran. Kesimpulan diperoleh dari hasil pembahasan yang telah dilakukan dan menjawab permasalahan yang ada. Saran adalah rekomendasi untuk penelitian selanjutnya.

1.7 Relevansi

Penulisan laporan tugas akhir ini diharapkan dapat memberikan beberapa manfaat, yaitu:

1. Dapat memberikan manfaat dalam perkembangan sistem tenaga khususnya pada permasalahan mengenai aliran daya optimal AC dengan memperhatikan batas keamanan.
2. Dapat menambah penguasaan ilmu pengetahuan dan teknologi di bidang optimasi pembangkitan tenaga listrik bagi penulis.
3. Sebagai referensi untuk pengembangan penelitian terkait masalah serupa.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2

ALIRAN DAYA OPTIMAL DENGAN BATAS KEAMANAN

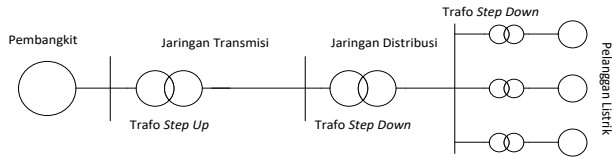
2.1 Sistem Tenaga Listrik

Umumnya sistem tenaga listrik dibagi menjadi empat bagian utama, pembangkitan, transmisi, distribusi dan beban seperti pada **gambar 2.1**. Energi listrik pada awalnya dibangkitkan pada sisi pembangkit yang dekat dengan sumber daya listrik, pembangkit yang digunakan dapat berupa PLTU, PLTG, PLTA ataupun kapasitas kecil seperti PLTD. Kemudian dari pembangkitan listrik disalurkan melalui saluran transmisi yang kemudian didistribusikan ke beban (pelanggan) [9].

Dengan jauhnya jarak antara pembangkit dengan beban, transmisi memiliki peran penting dalam penyaluran tenaga listrik. Jarak yang panjang dapat menyebabkan losses pada saluran semakin besar, sehingga tegangan pada transmisi dinaikkan terlebih dahulu agar arus yang mengalir pada saluran lebih kecil untuk mengurangi *losses*, kemudian tegangan diturunkan pada sisi distribusi. Terdapat beberapa parameter saluran transmisi yang harus diperhatikan seperti reaktansi, tahanan, dan kapasitansi yang dapat mempengaruhi aliran daya khususnya pada analisa aliran daya AC [10].

Terdapat tiga kriteria yang harus diperhatikan untuk mendapatkan operasi sistem tenaga listrik yang baik, diantaranya adalah *security*, *quality*, dan *economy* [3]. *Security* adalah kemampuan sistem dalam menghadapi gangguan tanpa terjadinya gangguan atau pemadaman. *Quality* adalah kemampuan sistem dalam beroperasi sesuai dengan batas dan standar yang ditentukan. *Economy* adalah bagaimana caranya untuk mengoptimalkan sistem agar dapat beroperasi dengan biaya yang murah tanpa melewati batas keamanan dan kualitas.

Dalam pelaksanaan pengendalian operasi sistem tenaga listrik, prioritas dari ketiga kriteria di atas tergantung pada kondisi *real time*. Saat terjadi gangguan, maka *security* adalah prioritas utama sedangkan mutu dan ekonomi tidak diutamakan. Kemudian pada saat keamanan dan kualitas sudah bagus, maka selanjutnya ekonomi harus dipertimbangkan.



Gambar 2. 1 Sistem tenaga listrik

2.2 Keamanan Sistem Tenaga

Dalam operasi sistem tenaga listrik, selain menemukan biaya pembangkitan paling minimum, ada hal lain yang perlu dilakukan yaitu menjaga keamanan sistem. Keamanan (*Security*) yang dimaksud adalah menjaga sistem agar dapat memenuhi kebutuhan beban tanpa melanggar batas-batasan seperti kapasitas saluran dan kapasitas pembangkit saat terjadi gangguan. Batasan pada kapasitas pembangkit ditujukan untuk menjaga gradien temperatur dan tekanan generator dalam batas aman sehingga dapat mencegah kerusakan dan menambah masa hidup generator. Kemudian batasan pada kapasitas saluran diberikan agar saluran tidak mengalami *overload* ketika terjadi gangguan, saluran yang mengalami *overload* dapat meningkatkan besar rugi daya dan menyebabkan penurunan tegangan pada bus. Penurunan tegangan pada bus nantinya akan berdampak pada peralatan yang menyebabkan kurang optimalnya kerja peralatan atau bahkan menyebabkan kerusakan.

Suatu kejadian yang disebabkan oleh kegagalan dari satu atau lebih pembangkit atau saluran biasa disebut dengan kontingensi. Salah satu cara dalam menjaga keamanan sistem adalah melalui analisis kontingensi dengan melakukan *re-dispatch* suplai daya pembangkit baik ketika keadaan normal maupun keadaan kontingensi agar tetap dalam batasan operasi pada saat terjadi gangguan [11]. Program yang dapat menyelesaikan permasalahan ini kemudian disebut dengan *Security Constrained Optimal Power Flow (SCOPF)* atau aliran daya optimal dengan batas keamanan [6]. Jenis kontingensi sering terjadi pada saluran transmisi, sehingga analisis kontingensi *SCOPF* dilakukan dengan memodelkan gangguan pada salah satu saluran sistem.

2.3 Optimal Power Flow

Studi aliran daya merupakan salah satu hal yang digunakan sebagai dasar dalam perencanaan. Melalui studi aliran daya, akan didapat data berupa *magnitude* dan sudut fasa tegangan pada bus, besar

daya aktif dan reaktif yang dibangkitkan, rugi-rugi jaringan, frekuensi, serta besar pembebanan.

Optimal Power Flow (OPF) sendiri merupakan pengembangan dari *economic dispatch* dengan mempertimbangkan aliran daya [6]. *OPF* dapat mengatur pembebanan masing-masing pembangkit yang terinterkoneksi dengan mempertimbangkan beberapa batasan tertentu untuk mendapat biaya pembangkitan paling murah. Analisa aliran daya optimal dapat melalui bentuk *DC* maupun *AC*. Untuk sistem interkoneksi besar, hasil dari perhitungan *DCOPF* dinilai kurang akurat, tetapi memiliki kelebihan sendiri dari segi penyederhanaan dan perhitungan yang cepat. Karena tingkat akurasi perhitungan akan mempengaruhi nilai ekonomis, diperlukan analisa berdasarkan *ACOPF* [8]. Meskipun model jaringan *AC* lebih rumit dalam penyelesaian optimisasi, tapi permodelan *AC* akan menggambarkan karakter jaringan yang lebih nyata melalui permodelan *losses*, dan perubahan tegangan yang selanjutnya dapat menawarkan manajemen risiko dan bagaimana cara memenuhi persyaratan dalam memenuhi pendapatan.

Dalam melakukan optimisasi, khususnya dalam permasalahan non-linier, *Sequential quadratic programming* merupakan salah satu metode yang unggul dalam hal efisiensi, akurasi dan prosentase solusi sukses dalam sejumlah tes permasalahan bila dibandingkan dengan metode lain [7]. *Sequential Quadratic Programming* dilakukan dalam tiga tahap, pertama adalah pembentukan matriks *Hessian* dari fungsi *Langrangian* menggunakan metode quasi-Newthon dari data sistem yang digunakan, kemudian dilanjutkan dengan permodelan permasalahan dalam *Quadratic Programming (QP)* yang akhirnya akan digunakan sebagai pencari nilai konvergensi pada daerah *feasible* yang diperbolehkan, sesuai dengan batasan-batasan yang ditentukan.

2.4 Persamaan Matematis Aliran Daya Optimal Arus Bolak Balik

ACOPF memiliki variable yang lebih banyak dan lebih sulit bila dibandingkan dengan *DCOPF*, selain itu persamaan jaringan yang tidak linier membuat solusi dari *ACOPF* lebih sulit.

Pada dasarnya *ACOPF* digunakan untuk menemukan biaya pembangkitan yang optimal, sehingga persamaan fungsi biaya pembangkit menjadi fungsi objektif dalam *ACOPF* yang umumnya merupakan persamaan orde dua. Dimodelkan sebagai berikut:

$$F_i(P_i) = a_i P_{gi}^2 + b_i P_{gi} + c_i \quad (2.1)$$

dimana:

$F_i(P_i)$ = besar biaya pembangkitan pada pembangkit ke-I (Rp)

P_{gi} = daya output generator-i (MW)

a_i, b_i, c_i = cost coefficient unit generator ke-i

Dalam aliran daya optimal, batasan persamaan (*equality constraint*) dan pertidaksamaan (*inequality constraint*) harus dipenuhi untuk hasil optimal. *Equality constraint* adalah batas dari keseimbangan aliran daya aktif dan reaktif (*power balance*), sedangkan *inequality constraint* adalah batas dari setiap saluran yang biasanya digunakan sebagai batas dari keamanan sistem. Persamaan matematis dari *equality constraint* memiliki persamaan *power balance* sebagai berikut:

$$P_i - jQ_i = (P_{gi} - P_{di}) + j(Q_{gi} - Q_{di}) = V_i^* (\sum_{j=1}^n V_j Y_{ij}) \quad (2.2)$$

$$Y_{ij} = G_{ij} - jB_{ij} \quad (2.3)$$

$$V_i = |V_i| e^{j\theta} \quad (2.4)$$

sehingga

$$P_i = P_{gi} - P_{di} = \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (2.5)$$

$$Q_i = Q_{gi} - Q_{di} = \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (2.6)$$

dimana:

i = nilai ke 1, 2, 3, ... n untuk bus-i

P_i = injeksi daya aktif bus-i

Q_i = injeksi daya reaktif bus-i

P_{gi} = daya aktif generator bus-i

Q_{gi} = daya reaktif generator bus-i

P_{di} = daya aktif beban bus-i

Q_{di} = daya reaktif beban bus-i

Y_{ij} = admitansi saluran dari bus-i ke bus-j

G_{ij} = konduktansi saluran dari bus-i ke bus-j

B_{ij} = suseptansi saluran dari bus-i ke bus-j

V_i = tegangan pada bus-i

V_j = tegangan pada bus-j

Untuk *Inequality constraint* dalam perhitungan aliran daya optimal mempunyai beberapa parameter yang harus dipenuhi, diantaranya adalah:

1. Batasan pembangkitan:

$$P_{gi}^{min} \leq P_{gi} \leq P_{gi}^{max} \quad i = 1, 2, \dots ng \quad (2.7)$$

$$Q_{gi}^{min} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi}^{max} \quad i = 1, 2, \dots ng \quad (2.8)$$

2. Batasan tegangan:

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max} \quad i = 1, 2, \dots nb \quad (2.9)$$

$$\theta_i^{min} \leq \theta_i \leq \theta_i^{max} \quad i = 1, 2, \dots nb \quad (2.10)$$

3. Batasan aliran daya saluran:

$$S_l \leq S_l^{max} \quad l = 1, 2, \dots nbr \quad (2.11)$$

dimana:

- P_{gi}^{min} = batas minimum daya aktif generator-i
- Q_{gi}^{min} = batas minimum daya reaktif generator-i
- P_{gi}^{max} = batas maksimum daya aktif generator-i
- Q_{gi}^{max} = batas maksimum daya reaktif generator-i
- V_i^{min} = batas minimum *magnitude* tegangan bus-i
- V_i^{max} = batas maksimum *magnitude* tegangan bus-i
- δ_i^{min} = batas minimum sudut fasa tegangan bus-i
- δ_i^{max} = batas maksimum sudut fasa tegangan bus-i
- S_l^{max} = batas maksimum aliran daya saluran-l
- ng = jumlah generator
- nb = jumlah bus
- nbr = jumlah saluran

2.5 Dynamic Optimal Power Flow (DOPF)

OPF konvensional tidak dapat diterapkan dalam operasi nyata karena dapat melanggar batasan *ramp rate* [12]. *Ramp rate* merupakan batasan kenaikan dan penurunan suplai pembangkit dalam interval waktu tertentu, karena itu muncul *Dynamic Optimal Power Flow (DOPF)*

sebagai pengembangan dari *OPF* konvensional dengan memperhitungkan parameter *ramp rate*.

Fungsi dan tujuan dari *DOPF* adalah untuk melakukan pembagian pembebanan pembangkit dalam jangka waktu tertentu dari beberapa interval waktu dengan tetap memenuhi batasan dan khususnya *ramp rate* dari pembangkit yang kemudian ditemukan biaya yang minimal [12]. *Ramp rate* merupakan batasan tambahan yang membedakan antara *DOPF* dengan *OPF* konvensional. Persamaan dari *DOPF* pun tidak jauh berbeda dengan *OPF* konvensional, hanya saja pada *DOPF* terdapat kondisi beban-t, yang kemudian fungsi biaya pembangkitan dimodelkan dengan persamaan berikut:

$$F_i^t(P_{gi}^t) = a_i(P_{gi}^t)^2 + b_iP_{gi}^t + c_i \quad (2.12)$$

Dengan P_{gi}^t merupakan suplai daya generator ke-i pada kondisi-t dan a_i, b_i, c_i adalah koefisien biaya generator ke-i, yang kemudian fungsi objektif dari *DOPF* adalah sebagai berikut:

$$\text{minimize } \sum_{t=1}^T (\sum_{i=1}^I F_i^t(P_{gi}^t)) \quad (2.13)$$

Persamaan di atas digunakan untuk meminimalkan biaya pembangkitan selama T interval waktu, dengan T adalah zona waktu diskrit. Untuk batasan *DOPF* juga dibagi menjadi menjadi dua, *equality constraint* dan *inequality constraint*.

Equality Constraint

Batasan *power balance*:

$$P_i^t = P_{gi}^t - P_{di}^t = \sum_{j=1}^n V_i^t V_j^t (G_{ij} \cos \theta_{ij}^t + B_{ij} \sin \theta_{ij}^t) \quad (2.14)$$

$$Q_i^t = Q_{gi}^t - Q_{di}^t = \sum_{j=1}^n V_i^t V_j^t (G_{ij} \sin \theta_{ij}^t - B_{ij} \cos \theta_{ij}^t) \quad (2.15)$$

Inequality Constraint

1. Batasan pembangkitan:

$$P_{gi}^{min} \leq P_{gi}^t \leq P_{gi}^{max} \quad i = 1, 2, \dots, ng \quad (2.16)$$

$$Q_{gi}^{min} \leq Q_{gi}^t \leq Q_{gi}^{max} \quad i = 1, 2, \dots, ng \quad (2.17)$$

2. Batasan tegangan:

$$V_i^{min} \leq V_i^t \leq V_i^{max} \quad i = 1, 2, \dots, nb \quad (2.18)$$

$$\theta_i^{min} \leq \theta_i^t \leq \theta_i^{max} \quad i = 1, 2, \dots nb \quad (2.19)$$

3. Batasan aliran daya saluran:

$$S_l^t \leq S_l^{max} \quad l = 1, 2, \dots nbr \quad (2.20)$$

4. Batasan *ramp rate*:

$$-\delta_i \leq P_{gi}^{t+1} - P_{gi}^t \leq \delta_i \quad i = 1, 2, \dots ng \quad (2.21)$$

δ_i adalah *ramp rate* dari generator- i yang mana pada tugas akhir ini diasumsikan *ramp up* dan *ramp down* memiliki nilai yang sama dan konstan.

2.6 DOPF dengan batas keamanan sistem

Untuk memenuhi batas keamanan sistem, kondisi kontingensi harus diberikan pada solusi *DOPF* demi memberikan pencegahan agar tidak ada pelanggaran batasan operasi ketika terjadi gangguan. Batasan *Ramp rate* juga harus ditambahkan di antara kondisi normal dan kondisi kontingensi dengan tujuan menjaga umur dari pembangkit dan peralatan pendukungnya, hal ini nantinya akan membuat batasan permasalahan *DOPF* menjadi bertambah, sehingga perhitungan optimasi menjadi lebih kompleks karena harus mengatur kondisi normal dan kontingensi agar sistem tetap dalam batasan meski terjadi gangguan.

Batasan-batasan kondisi normal

1. Batasan *power balance*:

$$P_i^t = P_{gi}^t - P_{di}^t = \sum_{j=1}^n V_i^t V_j^t (G_{ij} \cos \theta_{ij}^t + B_{ij} \sin \theta_{ij}^t) \quad (2.22)$$

$$Q_i^t = Q_{gi}^t - Q_{di}^t = \sum_{j=1}^n V_i^t V_j^t (G_{ij} \sin \theta_{ij}^t - B_{ij} \cos \theta_{ij}^t) \quad (2.23)$$

2. Batasan pembangkitan:

$$P_{gi}^{min} \leq P_{gi}^t \leq P_{gi}^{max} \quad i = 1, 2, \dots ng \quad (2.24)$$

$$Q_{gi}^{min} \leq Q_{gi}^t \leq Q_{gi}^{max} \quad i = 1, 2, \dots ng \quad (2.25)$$

3. Batasan tegangan:

$$V_i^{min} \leq V_i^t \leq V_i^{max} \quad i = 1, 2, \dots nb \quad (2.26)$$

$$\theta_i^{min} \leq \theta_i^t \leq \theta_i^{max} \quad i = 1, 2, \dots nb \quad (2.27)$$

4. Batasan aliran daya saluran:

$$S_l^t \leq S_l^{max} \quad l = 1, 2, \dots \text{nbr} \quad (2.28)$$

5. Batasan *ramp rate*:

$$-\delta_i \leq P_{gi}^{t+1} - P_{gi}^t \leq \delta_i \quad i = 1, 2, \dots \text{ng} \quad (2.29)$$

Batasan-batasan saat kontingensi:

1. Batasan *power balance*:

$$P_i^{kt} = P_{gi}^{kt} - P_{di}^{kt} = \sum_{j=1}^n V_i^{kt} V_j^{kt} (G_{ij} \cos \theta_{ij}^{kt} + B_{ij} \sin \theta_{ij}^{kt}) \quad (2.30)$$

$$Q_i^{kt} = Q_{gi}^{kt} - Q_{di}^{kt} = \sum_{j=1}^n V_i^{kt} V_j^{kt} (G_{ij} \sin \theta_{ij}^{kt} - B_{ij} \cos \theta_{ij}^{kt}) \quad (2.31)$$

2. Batasan pembangkitan:

$$P_{gi}^{min} \leq P_{gi}^{kt} \leq P_{gi}^{max} \quad i = 1, 2, \dots \text{ng} \quad (2.32)$$

$$Q_{gi}^{min} \leq Q_{gi}^{kt} \leq Q_{gi}^{max} \quad i = 1, 2, \dots \text{ng} \quad (2.33)$$

3. Batasan tegangan:

$$V_i^{min} \leq V_i^{kt} \leq V_i^{max} \quad i = 1, 2, \dots \text{nb} \quad (2.34)$$

$$\theta_i^{min} \leq \theta_i^{kt} \leq \theta_i^{max} \quad i = 1, 2, \dots \text{nb} \quad (2.35)$$

4. Batasan aliran daya saluran:

$$S_l^{kt} \leq S_l^{max} \quad l = 1, 2, \dots \text{nbr} \quad (2.36)$$

5. Batasan *ramp rate*:

$$\frac{-\delta_i}{12} \leq P_{gi}^{k(t+1)} - P_{gi}^t \leq \frac{\delta_i}{12} \quad i = 1, 2, \dots \text{ng} \quad (2.37)$$

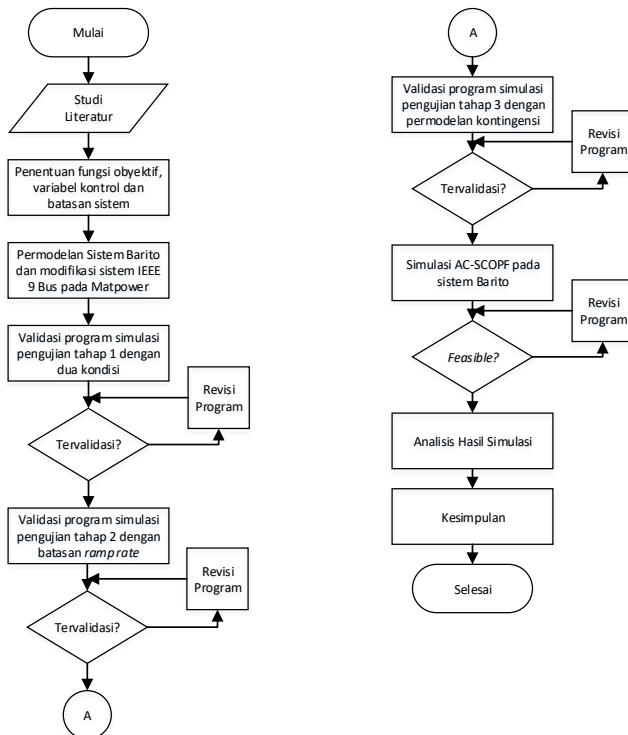
Pada batasan kontingensi terdapat kopling antara kondisi normal dan kontingensi yang berupa batasan *ramp rate*. Dimana pada kondisi kontingensi *ramp rate* diasumsi memiliki waktu *re-dispatch* 5 menit, sehingga batasan *ramp rate* bernilai 0,083 dari *ramp rate* generator ketika kondisi normal.

BAB 3

PENERAPAN SEQUENTIAL QUADRATIC PROGRAMMING DALAM ALIRAN DAYA OPTIMAL DENGAN MEMPERTIMBANGKAN BATAS KEAMANAN

3.1 Algoritma

Dalam penyelesaian tugas akhir ini, *sequential quadratic programming* digunakan sebagai metode analisa aliran daya. Pengolahan data dan simulasi dilakukan dengan menggunakan program Matpower yang telah dimodifikasi dengan alur sesuai ditunjukkan pada **Gambar 3.1**.



Gambar 3. 1 Diagram alir penyelesaian tugas akhir

Pengerjaan tugas akhir dimulai dengan studi literatur mengenai sistem kelistrikan, aliran daya optimal, keamanan sistem, dan kemudian penggunaan *sequential programming* untuk *ACOPF* dengan batas keamanan. Plan Barito merupakan *case* yang digunakan pada tugas akhir ini, sehingga pada studi literatur didapatkan parameter berupa data pembangkit, data beban, data saluran dan *cost function* berupa harga pembangkitan tiap jam-nya. Pengerjaan dilanjutkan dengan memodelkan Plan Barito dalam sebuah *M-file* yang digunakan sebagai *case* dari *Matpower*. Data yang perlu dimasukkan pada *M-file* diantaranya adalah *bus data*, *generator data*, *branch data*, dan *generator cost data*. Kemudian validasi dari program *AC-SCOPF* dapat dimulai dengan pengujian pada *case* IEEE 9 bus yang telah dimodifikasi.

Tahap pertama adalah melakukan validasi antara kondisi normal dan kontingensi dengan membuat matriks kondisi normal dan kontingensi bernilai sama. Pengujian dilakukan dengan melakukan cek pada variabel control sistem yang meliputi *magnitude* dan sudut tegangan serta daya pembangkitan tanpa adanya batasan *ramp rate*. Program valid jika nilai variabel kontrol antara kondisi normal dan kondisi kontingensi telah sama.

Tahap kedua adalah pengujian *AC-SCOPF* dengan batasan *ramp rate*. Pada tahap ini akan dilakukan simulasi dalam interval waktu tertentu, kemudian mengamati kenaikan dan penurunan daya pembangkit pada kondisi t ke kondisi $t+1$ apakah telah memenuhi batas *ramp rate* yang digunakan. Pengujian dilanjutkan dengan analisis *AC-SCOPF* dengan menggunakan dan tanpa menggunakan *ramp rate*.

Tahap ketiga adalah memodelkan kontingensi dengan memutus salah satu saluran yang memiliki dampak paling besar pada sistem. Pengujian dilakukan dengan cek batasan *ramp rate* dan kemudian membandingkan kondisi ketika memodelkan dan tanpa memodelkan kontingensi untuk mengetahui dampak penggunaan *SCOPF*.

Terakhir adalah menjalankan program *AC-SCOPF* pada Plan Barito, bila hasil ditemukan dengan nilai yang tidak layak (*no feasible*) maka harus dilakukan pengecekan pada file dan melakukan simulasi lagi hingga ditemukan hasil yang layak.

3.2 Sequential Quadratic Programming pada Matlab

Sequential quadratic programming merupakan salah satu metode yang unggul dalam metode optimasi *non-linear* dalam hal efisiensi, akurasi dan prosentase solusi sukses dalam sejumlah tes

permasalahan bila dibandingkan dengan metode lain [7]. *Sequential Quadratic Programming* dilakukan dalam tiga tahap, pertama adalah membentuk matriks Hessian dari fungsi Langrangian menggunakan metode quasi-Newthton, kemudian dilanjutkan dengan permodelan permasalahan dalam *Quadratic Programming (QP)* yang akhirnya akan digunakan dalam perhitungan fungsi merit.

SQP sendiri telah dimodelkan dalam program *Matlab* yang telah dikembangkan dengan nama *Matpower*. *Matpower* sendiri menyediakan beberapa tools untuk melakukan optimasi, salah satunya adalah *fminconf* yang dapat digunakan untuk mengolah batas pertidaksamaan yang diinginkan, untuk tugas akhir ini salah satunya adalah batasan *ramp rate* dari pembangkit. Dalam memenuhi batasan, ada beberapa input argumen yang perlu dimasukkan dalam *fminconf*, diantaranya adalah:

1. **fun** merupakan fungsi yang diminimalkan dan digunakan untuk menampung vektor x dan mengembalikan skalar f , fungsi tujuan yang dievaluasi pada vektor x .
2. **x0** adalah vektor yang menyatakan *initial point* dari vektor x .
3. **Aeq** matriks yang menyatakan koefisien linier dari *equality constraint*.
4. **beq** vektor yang menyatakan vektor konstan dari *equality constraint* dimana $Aeq \cdot x = beq$.
5. **Aineq** matriks yang menyatakan koefisien non linear dari *inequality constraint*.
6. **bineq** vektor yang menyatakan vektor konstan dari *inequality constraint*, dimana $Aineq \cdot x \leq bineq$.
7. **lb** vektor yang menyatakan batas nilai bawah dari persamaan $lb \leq x \leq ub$.
8. **ub** vektor yang menyatakan batas nilai atas dari persamaan $lb \leq x \leq ub$.

Matlab yang digunakan adalah *Matpower 3.2* dan *Matlab R2014a*, kompatibilitas dari keduanya mempengaruhi *Toolbox* yang digunakan dan sintaks yang ada. *M-file* modifikasi dari *Matpower3.2* yang digunakan diantaranya adalah:

1. **Runopf** merupakan *m-file* yang digunakan untuk menjalankan semua rangkaian simulasi dengan melakukan pemanggilan *m-file* lain dan menyusunnya untuk melakukan optimasi.
2. **Fminconf** merupakan program yang berfungsi sebagai *solver* dalam *OPF* dalam memenuhi batasan yang diinginkan,

pengguna juga dapat menambahkan batasan pertidaksamaan dalam *fmincopf* seperti batasan *ramp rate*.

3. **Costfmin** merupakan program untuk menyelesaikan *cost function* sebagai fungsi objektif.
4. **Consfmin** merupakan program untuk mengevaluasi *nonlinear constraints* dari persamaan dan pertidaksamaan serta bentuk Jacobian matriks dari kedua fungsi.
5. **Case File** adalah sebuah *m-file* yang berisi data dari plan yang digunakan.
6. **data.mat** merupakan *temporary file* yang digunakan untuk memodifikasi nilai beban sesuai kondisi yang ditentukan.

Seluruh program dan segala terkait modifikasi *m-file* harus diletakkan dalam satu folder. Untuk menghindari kesalahan pembacaan *file* dapat dilakukan *add path* pada *Matlab*. Dalam memodifikasi *m-file*, ada beberapa sintaksis khusus yang terdapat dalam masing-masing *m-file*, diantaranya adalah:

Sintaksis yang digunakan dalam *runopf* adalah:

1. **nargin** merupakan sintaksis yang digunakan untuk menentukan n masukan argument.
2. **casename** merupakan case yang digunakan dalam simulasi dari *Matpower*.
3. **loadcase** merupakan pembacaan data pada *casename* yang digunakan sebagai masukan bagi keseluruhan proses simulasi.
4. **opf (baseMVA, bus, ...)** merupakan perintah untuk menjalankan simulasi *opf* dengan data yang didapat pada *loadcase*.
5. **success** menampilkan informasi tentang tingkat konvergensi dari sebuah kondisi.

Sintaksis yang digunakan dalam *fmincopf* adalah:

1. **isstr** merupakan sintaksis yang digunakan untuk menggeser pembacaan, yang nantinya argument masukan digunakan sebagai selektor pada n masukan.
2. **mpoption** digunakan untuk mengatur dan menerima vektor pada *matpower*.
3. **x = fmincon(fun,x0,A,b)** digunakan untuk mendapatkan nilai minimal dari fungsi x dengan nilai awal *x0* yang diuraikan dalam fungsi *fun* yang terdapat pada *inequality constraints*.

4. **x = fmincon (fun,x0,A,b,Aeq,beq)** meminimalkan nilai dari fun dengan memasukkan nilai Aeq dan Beq sebagai pertidaksamaan. Jika tidak ada *inequality constraint*, maka A = [] dan B = [].
5. **x = fmincon (fun,x0,A,b,Aeq,beq,lb,ub)** Memberikan nilai bagi batas atas dan batas bawah dalam variabel x yang akan diselesaikan, sehingga nilai selalu *feasible* dengan $lb \leq x \leq ub$. Nilai dari *lower bound* dan *upper bound* mempengaruhi nilai dari Aeq dan beq sebagai pertidaksamaan. Jika tidak ada *equality constraint*, maka Aeq = [] dan beq = [], dan jika batas bawah x tidak ada maka lb = -inf dan jika batas atas x tidak ada maka ub = inf.
6. **nonlcon** merupakan sintaks yang digunakan untuk meminimalkan persamaan nonlinear.
7. **x = fmincon (fun,x0,A,b,Aeq,beq,lb,ub,nonlcon)** merupakan fungsi dengan subject sesuai *inequality constraint non-linear* c(x) atau *equality constraint* CEQ (x) yang didefinisikan dalam *nonlcon*. fmincon mengoptimalkan subject dengan memenuhi $c(x) \leq 0$ dan CEQ(x) = 0. Jika tidak ada batas nilai untuk x maka lb=[] dan ub=[].
8. **x = fmincon (fun, x0, A, b, Aeq, beq, lb, ub, nonlcon, options)** merupakan fungsi optimalisasi yang didalamnya termasuk struktur *option*, nilai option dapat didapatkan sebagai pengaturan nilai batasan. Jika tidak ada *equality dan inequality constraint non-linear* maka nonlcon = [].
9. **et** merupakan fungsi *estimated time* yaitu waktu yang dibutuhkan program untuk menyelesaikan permasalahan.
10. **nargout** berfungsi sebagai keluaran n output argument.
11. **fmoptions = optimset (...)** merupakan nilai *optimum set* awal yang dibutuhkan dari *tools* fmincon.

Sintaksis yang digunakan dalam costfmin adalah:

1. **ipol & ipwl** merupakan sintaksis sebagai selektor dari *cost function* generator yang digunakan dalam *case*.
2. **Piecewise linear cost** merupakan komen untuk mengetahui harga pembangkitan daya aktif dan reaktif, yang terdiri dari fungsi perhitungan pembangkitan yang sudah tergeneralisasi.
3. **Parms (...)** merupakan fungsi untuk mengubah data masukan menjadi variabel lain pada *m-file* terkait.

Sintaksis yang digunakan dalam consfmin file:

1. **geq** merupakan pembentukan dari matriks *equality constraint* yaitu persamaan *power balance*.
2. **g** merupakan pembentukan dari matriks *inequality constraints* yaitu batas dari saluran.
3. **dgeq** merupakan matriks Jacobian dari persamaan *power balance*.
4. **dg** merupakan matriks Jacobian dari pertidaksamaan, yaitu batas saluran.

Sintaksis yang digunakan dalam case adalah:

1. **baseMVA** merupakan nilai pembagi MVA yang digunakan, standar yang digunakan adalah 100.
2. **bus data** berisi jenis bus, urutan bus, kebutuhan P, kebutuhan Q, *shunt conductance*, *shunt susceptance*, besar tegangan dan sudut tegangan.
3. **generator data** berisi data peletakan generator pada bus ke-n, nilai pembangkitan daya aktif dan reaktif (maksimal dan minimal), nilai tegangan.
4. **branch data** merupakan data tentang saluran, diantaranya from-to, nilai resistansi, reaktansi, suspetansi, rating saluran ketika kondisi *long term*, *short term* dan darurat.
5. **area** berisi data penempatan.
6. **generator cost data** berisi data tentang harga pembangkitan dari generator, yang dapat dimodelkan dalam *piecewise linear* dan *polynomial*, harga *start up* dan *shut down* generator dalam satuan *USD*.

Data.mat merupakan *temporary file* yang pada *SCOPF* digunakan untuk memodifikasi nilai kebutuhan daya. Berikut sintaksis yang menyusun data.mat:

1. **Kondisi** dimodelkan dalam sebuah bilangan bulat sebagai jumlah kondisi yang akan disimulasikan.
2. **Pengalibeban** dimodelkan dalam matriks $1 \times n$ dengan nilai n tergantung pada kondisi dan nilai ke n selalu menjadi faktor pengali dari beban.

3.3 Penerapan Sequential Quadratic Programming dalam OPF

Penerapan *SQP* diawali dengan inisiasi permasalahan *DOPF* dalam program yang kemudian dilanjutkan pada *AC-DOPF*. Inisiasi permasalahan terdiri dari *objective function*, *equality constraint* dan *inequality constraint*.

3.3.1 Inisialisasi Permasalahan DOPF

1. Fungsi objektif berupa persamaan fungsi biaya:

$$\text{minimize } \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^{ng} F_i^t(P_{gi}^t) \right) \quad (3.1)$$

$$F_i^t(P_{gi}^t) = a_i(P_{gi}^t)^2 + b_i P_{gi}^t + c_i \quad (3.2)$$

dimana:

$F_i^t(P_{gi}^t)$ = Besar biaya pembangkitan pada pembangkit ke-i pada waktu ke-t

P_{gi}^t = Daya output dari pembangkit ke-i pada waktu ke-t

T = jumlah rentang waktu beban

ng = jumlah generator

a_i, b_i, c_i = koefisien biaya pembangkitan ke-i

2. *Equality constraint*, dari pencarian solusi aliran daya optimal adalah persamaan *power balance*:

$$P_i^t = P_{gi}^t - P_{di}^t = \sum_{j=1}^n V_i^t V_j^t (G_{ij} \cos \theta_{ij}^t + B_{ij} \sin \theta_{ij}^t) \quad (3.3)$$

$$Q_i^t = Q_{gi}^t - Q_{di}^t = \sum_{j=1}^n V_i^t V_j^t (G_{ij} \sin \theta_{ij}^t - B_{ij} \cos \theta_{ij}^t) \quad (3.4)$$

3. *Inequality constraint*, dari pencarian solusi aliran daya optimal dapat dimodelkan menjadi:

Batasan pembangkitan:

$$P_{gi}^{\min} \leq P_{gi}^t \leq P_{gi}^{\max} \quad i = 1, 2, \dots, ng \quad (3.5)$$

$$Q_{gi}^{\min} \leq Q_{gi}^t \leq Q_{gi}^{\max} \quad i = 1, 2, \dots, ng \quad (3.6)$$

Batasan tegangan:

$$V_i^{min} \leq V_i^t \leq V_i^{max} \quad i = 1, 2, \dots nb \quad (3.7)$$

$$\theta_i^{min} \leq \theta_i^t \leq \theta_i^{max} \quad i = 1, 2, \dots nb \quad (3.8)$$

Batasan aliran daya saluran:

$$S_l^t \leq S_l^{max} \quad l = 1, 2, \dots nbr \quad (3.9)$$

Batasan *ramp rate*:

$$-\delta_i \leq P_{gi}^{t+1} - P_{gi}^t \leq \delta_i \quad i = 1, 2, \dots ng \quad (3.10)$$

Variabel kontrol adalah variabel yang akan dioptimasi dalam suatu program, dalam permasalahan *ACOPF* variabel kontrol diuraikan dalam bentuk *magnitude* dan sudut tegangan serta daya aktif dan reaktif dari pembangkit. Jika nb adalah jumlah bus dan ng adalah jumlah generator dengan n adalah jumlah variabel, maka x, matriks variabel kontrol dari *ACOPF* dirumuskan sebagai $x = [n, 1]$ dengan $n = 2nb + 2$ ng. Bila nb = 3, ng =2, maka ukuran matriks x adalah [10, 1] dengan *magnitude* dan sudut tegangan masing-masing sebanyak 3 variabel dan daya aktif-reaktif masing-masing memiliki 2 variabel atau dapat dituliskan sebagai:

$$x = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ P_{g1} \\ P_{g2} \\ Q_{g1} \\ Q_{g2} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

3.3.2 AC-DOPF Pada Sequential Quadratic Programming

3.3.2.1 Inisialisasi x_0 Sebagai Variabel Kontrol Awal

Pada struktur Matlab struktur optimasi dimulai dengan inisialisasi x_0 sebagai variabel kontrol yang akan diminimalisasi pada fungsi. Untuk kondisi beban = t maka ukuran matriks x_0 merupakan matriks x yang dimodifikasi menjadi $[(2nb+2ng)*t, 1]$. Untuk sistem dengan nb = 3, ng = 2 dan kondisi beban = t, maka matriks x_0 dapat dituliskan sebagai:

$$x_0 = \begin{bmatrix} \theta_{1\ 1} \\ \theta_{2\ 1} \\ \theta_{3\ 1} \\ v_{1\ 1} \\ v_{2\ 1} \\ v_{3\ 1} \\ p_{g1\ 1} \\ p_{g2\ 1} \\ Q_{g1\ 1} \\ Q_{g2\ 1} \\ \vdots \\ \theta_{1\ t} \\ \theta_{2\ t} \\ \theta_{3\ t} \\ v_{1\ t} \\ v_{2\ t} \\ v_{3\ t} \\ p_{g1\ t} \\ p_{g2\ t} \\ Q_{g1\ t} \\ Q_{g2\ t} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

3.3.2.2 Awal Pembentukan Fungsi Objektif

Harga optimal pembangkitan merupakan fungsi objektif dari AC-DOPF, dengan persamaan dari fungsi objektif adalah:

$$f = \sum_{i=1}^{jam} f_i \quad (3.13)$$

F merupakan nilai total biaya pembangkitan sedangkan df adalah turunan dari fungsi f dengan nilai f dijumlahkan untuk setiap kondisi beban. Dimensi matriks yang ada dalam fungsi objektif ini sama dengan dimensi dari variabel kontrol, sehingga dengan ukuran nb =3 dan ng =2, maka ukuran matriks df dapat dituliskan sebagai **3.14**.

$$df = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{df}{p_{g1}} \\ \frac{df}{p_{g2}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Sedangkan dengan kondisi beban = t, maka ukuran matriks df dimodifikasi menjadi $[(2nb+2ng)*t, 1]$, sehingga matriks df menjadi:

$$df = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{df}{p_{g1\ 1}} \\ \frac{df}{p_{g2\ 1}} \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{df}{p_{g1\ t}} \\ \frac{df}{p_{g2\ 1}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

3.3.2.3 Pembentukan Equality Constraint

Batas persamaan (*equality constraint*) dari *AC-DOPF*, *power balance* dimodelkan dalam dua matriks yaitu *geq* dan matriks *dgeq* (turunan dari *geq*). Ukuran matriks *geq* adalah $[2nb, 1]$, untuk sistem dengan $nb= 3$ dan $ng= 2$ dengan 2 beban yang terletak di bus 1 dan 3, maka matriks awal dari *geq* adalah sebagai berikut:

$$geq = \begin{bmatrix} P_{d1} \\ 0 \\ P_{d2} \\ Q_{d1} \\ 0 \\ Q_{d2} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Untuk kondisi beban = t , ukuran matriks *geq* dimodifikasi menjadi $[2nb*t, 1]$, sehingga matriks *geq* menjadi:

$$geq = \begin{bmatrix} P_{d1\ 1} \\ 0 \\ P_{d2\ 1} \\ Q_{d1\ 1} \\ 0 \\ Q_{d2\ 1} \\ \vdots \\ P_{d1\ t} \\ 0 \\ P_{d2\ t} \\ Q_{d1\ t} \\ 0 \\ Q_{d2\ t} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Ukuran matriks *dgeq* adalah $[(2nb+2ng)*2, 2nb*2]$. Pada matriks *dgeq* setiap bagian diturunkan terhadap bagian tersebut. Apabila $b = \text{jumlah bus}$ dan $m = \text{jumlah generator}$, maka dapat ditulis sebagai **3.18**.

Aktif power balance reaktif power balance

$$d_{geq} = \begin{bmatrix} \frac{geq}{d\theta_{11}} & \dots & \frac{geq}{d\theta_{1b}} & \frac{geq}{d\theta_{11}} & \dots & \frac{geq}{d\theta_{1b}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{geq}{d\theta_{b1}} & \dots & \frac{geq}{d\theta_{bb}} & \frac{geq}{d\theta_{b1}} & \dots & \frac{geq}{d\theta_{bb}} \\ \frac{geq}{dv_{11}} & \dots & \frac{geq}{dv_{1b}} & \frac{geq}{dv_{11}} & \dots & \frac{geq}{dv_{1b}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{geq}{dv_{b1}} & \dots & \frac{geq}{dv_{bb}} & \frac{geq}{dv_{b1}} & \dots & \frac{geq}{dv_{bb}} \\ \frac{geq}{dP_{g1}} & \dots & \frac{geq}{dP_{gm}} & \frac{geq}{dP_{g1}} & \dots & \frac{geq}{dP_{gm}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{geq}{dQ_{g1}} & \dots & \frac{geq}{dQ_{gm}} & \frac{geq}{dQ_{g1}} & \dots & \frac{geq}{dQ_{gm}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{geq}{dQ_m} & \dots & \frac{geq}{dQ_m} & \frac{geq}{dQ_m} & \dots & \frac{geq}{dQ_m} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Untuk kondisi beban = t, matriks d_{geq} disusun dibawah secara diagonal dengan bagian lain bernilai *zeros* (nol). Sehingga ukuran matriks d_{geq} menjadi $[(2nb+2ng)*t, 2nb*t]$, berikut merupakan matriks d_{geq} dengan periode lebih dari satu kondisi :

$$d_{geq} = \begin{bmatrix} d_{geq_1} & zeros & zeros & zeros \\ zeros & d_{geq_2} & zeros & zeros \\ zeros & zeros & \ddots & zeros \\ zeros & zeros & zeros & d_{geq_t} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Dalam permodelan *Matpower*, matriks dimodelkan oleh *m-file* bernama *constrmin* yang mampu mengevaluasi nonlinear constraints dari persamaan dan pertidaksamaan serta bentuk Jacobian matriks dari kedua fungsi.

3.3.2.4 Pembentukan Inequality Constraint

Dalam permasalahan ACOPF *inequality constraint* berupa batas aliran daya dengan from bus dan to bus limit yang dimodelkan dalam matriks g dan dg . Bila diketahui sistem dengan 3 bus, 2 generator dan 3 saluran ($nbr=3$), maka ukuran awal dari matriks g adalah pada **3.20**, sedangkan untuk level beban = t, maka matriks g akan menjadi **3.21**

$$g = \begin{bmatrix} Sf_1 \\ Sf_2 \\ Sf_3 \\ St_1 \\ St_2 \\ St_3 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$g = \begin{bmatrix} Sf_{1\ 1} \\ Sf_{2\ 1} \\ Sf_{3\ 1} \\ St_{1\ 1} \\ St_{2\ 1} \\ St_{3\ 1} \\ \vdots \\ Sf_{1\ t} \\ Sf_{2\ t} \\ Sf_{3\ t} \\ St_{1\ t} \\ St_{2\ t} \\ St_{3\ t} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Sedangkan matriks dg adalah turunan dari g , misal dengan $b =$ jumlah bus, $m =$ jumlah generator dan $br =$ jumlah saluran maka matriks dg menjadi **3.22**. Untuk kondisi beban = t maka matriks dg disusun dibawah secara diagonal. Sehingga ukuran matriks dg adalah $[(2nb+2ng)*t, 2nbr*t]$ dan menjadi seperti **3.23**.

$$dg = \begin{bmatrix} \frac{g}{d\theta_{1\ 1}} & \dots & \frac{g}{d\theta_{1\ br}} & \frac{g}{d\theta_{1\ 1}} & \dots & \frac{g}{d\theta_{1\ br}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{g}{d\theta_{b\ 1}} & \dots & \frac{g}{d\theta_{b\ br}} & \frac{g}{d\theta_{b\ 1}} & \dots & \frac{g}{d\theta_{b\ br}} \\ \frac{g}{dv_{1\ 1}} & \dots & \frac{g}{dv_{1\ br}} & \frac{g}{dv_{1\ 1}} & \dots & \frac{g}{dv_{1\ br}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{g}{dv_{b\ 1}} & \dots & \frac{g}{dv_{b\ br}} & \frac{g}{dv_{b\ 1}} & \dots & \frac{g}{dv_{b\ br}} \\ \frac{g}{dP_{g1}} & \dots & \frac{g}{dP_{g1}} & \frac{g}{dP_{g1}} & \dots & \frac{g}{dP_{g1}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{g}{dP_{gm}} & \dots & \frac{g}{dP_{gm}} & \frac{g}{dP_{gm}} & \dots & \frac{g}{dP_{gm}} \\ \frac{g}{dQ_{g1}} & \dots & \frac{g}{dQ_{g1}} & \frac{g}{dQ_{g1}} & \dots & \frac{g}{dQ_{g1}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{g}{dQ_m} & \dots & \frac{g}{dQ_m} & \frac{g}{dQ_m} & \dots & \frac{g}{dQ_m} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

$$dg = \begin{bmatrix} dg_1 & \text{zeros} & \text{zeros} & \text{zeros} \\ \text{zeros} & dg_2 & \text{zeros} & \text{zeros} \\ \text{zeros} & \text{zeros} & \ddots & \text{zeros} \\ \text{zeros} & \text{zeros} & \text{zeros} & dg_t \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Untuk *SCOPF* sendiri *inequality constraint* dimodifikasi dengan menambahkan batasan *ramp rate* yang masuk dalam matriks *Af* dan *bf* dimana $Af^*x \leq bf$. Batasan ramp rate dimasukkan dalam matriks *bf* sedangkan matriks untuk ramp rate dimasukkan dalam matriks *Af*. Misal untuk sistem dengan jumlah bus =3, generator = 2 dan level beban = 2, maka matriks untuk kondisi normal ke kondisi normal selanjutnya menjadi:

$$Af = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

$$bf = \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_1 \\ \delta_2 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Ketika kondisi kontingensi, ramprate diasumsikan hanya bekerja 0,083 kali, sehingga matriks *Af* dimodifikasi menjadi **3.26**. Dalam permodelan *Matpower*, sama halnya dengan matriks *equality constraint*, matriks *inequality constraint* juga dimodelkan dalam *m-file consfmin*.

$$Af = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 12 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -12 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 12 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -12 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -12 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 12 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -12 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 12 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

3.3.2.5 Permodelan Batas Atas dan Bawah

Variabel kontrol adalah variabel yang dioptimasi agar berada dalam batas atas dan bawah dari kondisi yang dibuat. Batas atas dan bawah ini dimodelkan dalam vektor lb (*lower bound*) dan ub (*upper bound*). Ukuran dari vektor lb dan ub pun sama dengan variabel kontrol, sehingga vektor lb dan ub menjadi **3.27** dan dengan kondisi beban = t maka akan dimodifikasi menjadi **3.28**.

$$\begin{bmatrix} \theta_{1min}^t \\ \theta_{2min}^t \\ \theta_{3min}^t \\ v_{1min}^t \\ v_{2min}^t \\ v_{3min}^t \\ p_{g1min}^t \\ p_{g2min}^t \\ Q_{g1min}^t \\ Q_{g2min}^t \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \theta_1^t \\ \theta_2^t \\ \theta_3^t \\ v_1^t \\ v_2^t \\ v_3^t \\ p_{g1}^t \\ p_{g2}^t \\ Q_{g1}^t \\ Q_{g2}^t \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \theta_{1max}^t \\ \theta_{2max}^t \\ \theta_{3max}^t \\ v_{1max}^t \\ v_{2max}^t \\ v_{3max}^t \\ p_{g1max}^t \\ p_{g2max}^t \\ Q_{g1max}^t \\ Q_{g2max}^t \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

$$\text{lb} = \begin{bmatrix} \theta_{1min}^1 \\ \theta_{2min}^1 \\ \theta_{3min}^1 \\ v_{1min}^1 \\ v_{2min}^1 \\ v_{3min}^1 \\ p_{g1min}^1 \\ p_{g2min}^1 \\ Q_{g1min}^1 \\ Q_{g2min}^1 \\ \vdots \\ \theta_{1min}^t \\ \theta_{2min}^t \\ \theta_{3min}^t \\ v_{1min}^t \\ v_{2min}^t \\ v_{3min}^t \\ p_{g1min}^t \\ p_{g2min}^t \\ Q_{g1min}^t \\ Q_{g2min}^t \end{bmatrix} \quad \text{ub} = \begin{bmatrix} \theta_{1max}^1 \\ \theta_{2max}^1 \\ \theta_{3max}^1 \\ v_{1max}^1 \\ v_{2max}^1 \\ v_{3max}^1 \\ p_{g1max}^1 \\ p_{g2max}^1 \\ Q_{g1max}^1 \\ Q_{g2max}^1 \\ \vdots \\ \theta_{1max}^t \\ \theta_{2max}^t \\ \theta_{3max}^t \\ v_{1max}^t \\ v_{2max}^t \\ v_{3max}^t \\ p_{g1max}^t \\ p_{g2max}^t \\ Q_{g1max}^t \\ Q_{g2max}^t \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

3.4 Sistem Kelistrikan Kalimantan Selatan dan Tengah

Pada tahun 2016, rasio elektrifikasi Kalimantan rata-rata hanya mencapai 84,87%, sehingga tahun ini PLN merencanakan untuk melakukan perencanaan pengembangan sistem kelistrikan di Regional Kalimantan, salah satunya adalah sistem kelistrikan Kalimantan Selatan dan Tengah atau saat ini disebut dengan sistem kelistrikan Barito [2]. Sistem kelistrikan Barito sendiri memiliki 34 bus yang terinterkoneksi dalam tegangan 150 kV dengan total 44 saluran transmisi, disuplai oleh 7 proyek pembangkit yang terdiri dari PLTU, PLTA dan PLTMG. Dalam melakukan simulasi *AC-SCOPF* pada sistem Barito, data pembangkit dimodelkan dalam 6 unit. *Single line diagram* Barito dapat dilihat pada gambar 3.2.

3.4.1 Data Pembangkit Kalimantan Selatan dan Tengah

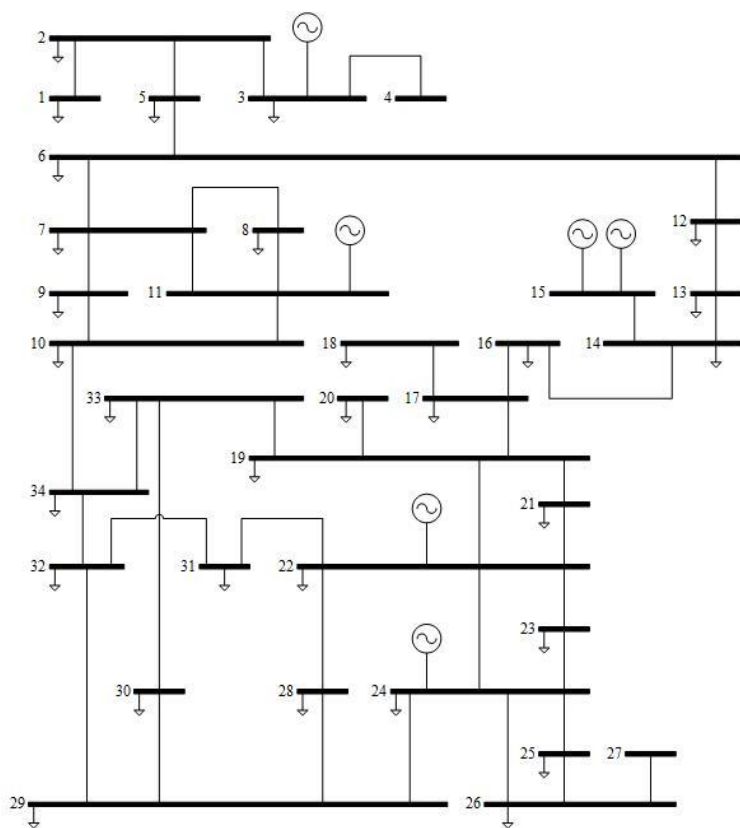
Pembangkit yang terpasang pada sistem Barito tahun 2018 berjumlah 39 unit yang terdiri dari 7 unit PLTU, 31 unit PLMTG dan 1 unit PLTA dengan total daya yang mampu dibangkitkan sebanyak 800 MW seperti yang dijabarkan pada tabel 3.1. Dalam melakukan simulasi *AC-SCOPF* pada sistem Barito, 39 unit pembangkit dimodelkan dalam 6 unit dengan meninjau jenis, kapasitas dan lokasi pembangkit dengan data *ramp-rate* sebagai batas keamanan diambil dari [13], [14] seperti yang diuraikan pada tabel 3.2.

3.4.2 Data Gardu Induk Kalimantan Selatan dan Tengah

Sistem kelistrikan Kalimantan Selatan dan Tengah terdiri dari 34 gardu induk (bus) 150 kV dengan total beban sebesar 617,55 MW. Daya reaktif dimodelkan dengan mengasumsikan faktor daya dari semua beban ada 0,85 dan batas tegangan yang digunakan adalah 0,9 hingga 1,1 pu seperti yang dijabarkan pada tabel 3.3

3.4.3 Data Saluran Kalimantan Selatan dan Tengah

Sistem kelistrikan Kalimantan Selatan dan Tengah didukung dengan 44 saluran yang terdiri saluran *single circuit* dan *double circuit* dengan tiga jenis konduktor yaitu *Single Hawk*, *Double Hawk*, dan *ACSR* 1x330mm. Kms merupakan kepanjangan dari kilometer sirkuit, yang mana jarak sesungguhnya dari saluran *double circuit* adalah setengah dari nilai kms. Data impedansi dijabarkan dalam satuan pu, sesuai pada tabel 3.4



Gambar 3. 2 *Single line diagram* Barito 2018

Tabel 3. 1 Data pembangkit Barito

Provinsi Kalimantan	GI	Jenis	Kapasitas (MW)	Jumlah	Total (MW)
Tengah	Sampit	PLTU	25	1	25
Tengah	Pulpis	PLTU	65	2	130
Tengah	Bangkanai	PLTMG	10	16	160
Tengah	Bangkanai	PLTMG	9	15	135
Selatan	Cempaka	PLTA	90	1	90
Selatan	Asam-Asam	PLTU	65	4	260

Tabel 3. 2 Fungsi pembangkitan dan ramp rate pembangkit Barito

Unit	<i>Cost Function</i>	<i>Ramp Rate</i> (MW/5 menit)	Referensi
1	$0.0704P_1^2 + 59.7183P_1 + 0.2113$	5	[13]
2	$0.0563P_1^2 + 58.2254P_1 + 0.1690$	15	[13]
3	$0.0634P_1^2 + 112.4225P_1 + 0.1901$	560	[14]
4	$0.0282P_1^2 + 126.6479P_1 + 0.0845$	560	[14]
5	$0.0352P_1^2 + 8.3099P_1 + 0.1056$	750	[13]
6	$0.0493P_1^2 + 57.5493P_1 + 0.1479$	20	[13]

Tabel 3. 3 Data gardu induk Barito

Gardu Induk	Nomor Bus	Beban		Batas Tegangan	
		P (MW)	Q (MVAR)	Vmax	Vmin
Pangkalan Bun	1	28.4	17.60334	1.1	0.9
Sampit	2	28.88	17.89549	1.1	0.9
PLTU Sampit	3	7.78	4.821205	1.1	0.9
Kuala Pambuang	4	0	0	1.1	0.9
Parenggean	5	6.05	3.749826	1.1	0.9
Kasongan	6	16.22	10.05147	1.1	0.9
Palangkaraya	7	32.18	19.94054	1.1	0.9
New Palangkaraya	8	21.61	13.39224	1.1	0.9
Pulang Pisau	9	9	5.577124	1.1	0.9
Selat	10	24.09	14.93039	1.1	0.9
PLTU Pulpis	11	0	0	1.1	0.9
Kuala Kurun	12	3.68	2.28217	1.1	0.9
Puruk Cahu	13	4.78	2.96436	1.1	0.9
Muara Teweh	14	9.95	6.168881	1.1	0.9
Bangkanai	15	0	0	1.1	0.9
Buntok	16	11.02	6.83139	1.1	0.9
Tanjung	17	25.21	15.62561	1.1	0.9
Paringin	18	13.47	8.35006	1.1	0.9
Barikin	19	38.69	23.97911	1.1	0.9
Amuntai	20	24.81	15.37587	1.1	0.9
Rantau	21	26.57	16.4692	1.1	0.9

Tabel 3. 3 Data gardu induk Barito (lanjutan)

Gardu Induk	Nomor Bus	Beban		Batas Tegangan	
		P (MW)	Q (MVAR)	Vmax	Vmin
Cempaka	22	63.01	39.04997	1.1	0.9
Pelaihari	23	27.48	17.03121	1.1	0.9
Asam-Asam	24	12.39	7.676332	1.1	0.9
Satui	25	14.68	9.098686	1.1	0.9
Batulicin	26	27.77	17.20809	1.1	0.9
Kotabaru	27	0	0	1.1	0.9
Bandara	28	20.49	12.7012	1.1	0.9
Mantuil	29	35.43	21.95729	1.1	0.9
Sei Tabuk	30	13.83	8.571032	1.1	0.9
GIS Ulin	31	25.93	16.07068	1.1	0.9
Trisakti	32	13.41	8.309761	1.1	0.9
Kayutangi	33	17.48	10.83436	1.1	0.9
Sebrang Barito	34	13.26	8.218415	1.1	0.9

Tabel 3. 4 Data saluran Barito

fbus	tbus	Jenis Konduktor	Circuit	kms	r	x	rateA
1	2	2xHawk	Double	344	0.025	0.107	550
2	3	1xHawk	Double	84	0.012	0.038	278
3	4	2xHawk	Double	160	0.012	0.050	550
2	5	2xHawk	Single	30	0.009	0.037	275
2	6	2xHawk	Single	100	0.029	0.124	275
5	6	2xHawk	Single	70	0.020	0.087	275
6	12	2xHawk	Double	240	0.017	0.074	550
12	13	2xHawk	Double	196	0.014	0.061	550
13	14	2xHawk	Double	94	0.007	0.029	550
14	15	2xHawk	Double	100	0.007	0.031	550
14	16	2xHawk	Double	220	0.016	0.068	550
16	17	2xHawk	Double	260	0.019	0.081	550
17	18	2xHawk	Single	58	0.017	0.072	275
18	19	2xHawk	Single	2	0.001	0.002	275
17	19	2xHawk	Single	60	0.017	0.074	275

Tabel 3. 4 Data saluran Barito (lanjutan)

fbus	tbus	Jenis Konduktor	Circuit	kms	r	x	rateA
19	20	1xHawk	Single	40	0.023	0.072	139
19	21	1xHawk	Single	46	0.026	0.082	139
21	22	1xHawk	Single	61	0.035	0.109	139
19	22	1xHawk	Single	106	0.061	0.191	139
22	23	1x330mm	Single	33	0.014	0.058	169
23	24	1x330mm	Single	59	0.025	0.104	169
22	24	1x330mm	Single	92	0.039	0.162	169
24	25	1xHawk	Single	77	0.044	0.139	139
25	26	1xHawk	Single	50	0.029	0.090	139
24	26	1xHawk	Single	127	0.073	0.229	139
26	27	1xHawk	Double	37	0.005	0.017	278
24	29	2xHawk	Double	110	0.008	0.034	550
22	31	2xHawk	Double	64	0.005	0.020	550
31	32	1xHawk	Double	24	0.003	0.011	278
29	32	2xHawk	Double	16	0.001	0.005	550
32	34	1xHawk	Double	15	0.002	0.007	278
29	30	2xHawk	Double	30	0.002	0.009	550
30	33	2xHawk	Double	30	0.002	0.009	550
19	33	2xHawk	Double	240	0.017	0.074	550
33	34	1xHawk	Double	17	0.002	0.008	278
22	28	2xHawk	Double	12	0.001	0.004	550
28	29	2xHawk	Double	16	0.001	0.005	550
34	10	1xHawk	Double	84	0.012	0.038	278

Data dari sistem Kalimantan Selatan dan Tengah tahun 2018 kemudian dimodelkan dalam *software Matlab*, daya pembangkitan menggunakan satuan MW untuk daya aktif, dan MVAR untuk daya reaktif, sedangkan untuk impedansi saluran (r, x, dan b) dan tegangan menggunakan satuan p.u. Dari permodelan tersebut kemudian dilakukan simulasi menggunakan *Matpower* yang menerapkan metode *sequential quadratic programming*, dimana hasil analisis dari simulasi dijabarkan pada BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS.

BAB 4

SIMULASI DAN ANALISIS

4.1 Simulasi Sistem IEEE 9 Bus

Pengujian pada program aliran daya optimal dengan mempertimbangkan batas keamanan atau *SCOPF* harus melalui validasi terlebih dahulu untuk mendapatkan hasil yang sesuai. Tahap validasi ini dibagi dalam tiga tahap yang dilakukan secara berurutan, yaitu:

1. Validasi tanpa batasan
2. Validasi dengan batasan *ramp rate*
3. Validasi dengan kondisi kontingensi

Validasi dilakukan pada sistem IEEE 9 bus yang telah dimodifikasi dengan data sesuai **tabel 4.1**, **tabel 4.2**, dan **tabel 4.3** yang secara berurutan merupakan data pembangkit, saluran dan beban. Modifikasi dilakukan dengan menurunkan beban pada bus 5 dari IEEE 9 bus yang asli.

Tabel 4. 1 Data Pembangkit Sistem Modifikasi IEEE 9 bus

Unit	<i>Cost Function</i>	P max (MW)	P min (MW)	<i>Ramp Rate</i> (MW/Jam)
1	$0.11P_1^2 + 5P_1 + 150$	250	10	30
2	$0.085P_2^2 + 1.2P_2 + 600$	300	10	40
3	$0.1225P_3^2 + P_3 + 335$	270	10	35

Tabel 4. 2 Data Saluran Sistem Modifikasi IEEE 9 bus

Saluran	From Bus	To Bus	x	Kapasitas Saluran (MVA)
1	1	4	0.0576	250
2	4	5	0.092	250
3	5	6	0.17	150
4	3	6	0.0586	300
5	6	7	0.1008	150
6	7	8	0.072	250
7	8	2	0.0625	250
8	8	9	0.161	250
9	9	4	0.085	250

Tabel 4. 3 Data Beban Sistem Modifikasi IEEE 9 bus

Bus	Beban (MW)
1	0
2	0
3	0
4	0
5	100
6	0
7	120
8	0
9	145

4.1.1 Validasi Tahap 1

Validasi ini dilakukan dengan membandingkan antara kondisi jam t dan jam $t+1$. Validasi terpenuhi apabila hasil variabel output antara kondisi jam t dan jam $t+1$ memiliki nilai yang sama. Hal ini dilakukan agar tidak ada variabel lain yang mempengaruhi selain batasan *ramp rate* dan kondisi kontingensi. Pengujian dilakukan dengan profil beban yang telah dipaparkan pada **tabel 4.3** dan kemudian diterapkan pada kondisi jam t dan jam $t+1$ kemudian menganalisa perbandingan hasil variabel output.

4.1.1.1 Simulasi Validasi Tahap 1

Perbandingan hasil validasi *SCOPF* kondisi jam t dan jam $t+1$ dapat dilihat pada **tabel 4.4**, dimana variabel output terdiri dari sudut tegangan (θ), magnitude tegangan (V), daya aktif (P) dan reaktif (Q) pembangkitan serta total biaya pembangkitan.

Tabel 4. 4 Hasil variabel output pada simulasi validasi tahap 1

Variabel Output	Jam t	Jam t+1
θ1	0.000	0.000
θ2	0.091	0.091
θ3	0.060	0.060
θ4	-0.051	-0.051
θ5	-0.081	-0.081
θ6	0.006	0.006
θ7	-0.032	-0.032
θ8	0.011	0.011
θ9	-0.097	-0.097
V1	1.100	1.100
V2	1.100	1.100
V3	1.088	1.088
V4	1.093	1.093
V5	1.082	1.082
V6	1.100	1.100
V7	1.088	1.088
V8	1.100	1.100
V9	1.068	1.068
P1	1.063	1.063
P2	1.546	1.546
P3	1.083	1.083
Q1	0.167	0.167
Q2	0.055	0.055
Q3	-0.198	-0.198
Total Daya Terbangkitkan (MW)	365	365
Total Biaya Pembangkitan (\$)	6623	6623

4.1.1.2 Analisis Validasi Tahap 1

Berdasarkan hasil dari simulasi IEEE 9 bus menggunakan AC-SCOPF, didapat bahwa variabel output dari kondisi jam t dan jam t+1 bernilai sama pada masing-masing variabelnya, sehingga program ini dapat digunakan untuk memodelkan jam t+1 dengan hanya dipengaruhi kondisi kontingensi dan batasan *ramp rate*.

4.1.2 Validasi Tahap 2

Validasi ini dilakukan dengan menggunakan *ramp rate* sebagai penghubung antara kondisi jam t dan jam $t+1$. Validasi terpenuhi apabila daya terbangkitkan pada masing-masing unit pembangkit tidak melanggar batas *ramp rate* ketika berpindah dari kondisi jam t ke jam $t+1$. Hasil biaya pembangkitan kemudian dianalisa untuk mengetahui dampak dari penggunaan batasan *ramp rate*. Untuk validasi tahap ini, profil beban dibuat dalam 5 kondisi untuk mendapatkan pengaruh batasan *up rate* dan *down rate* seperti pada **tabel 4.5**.

4.1.2.1 Simulasi Validasi Tahap 2

Batasan *ramp rate* yang digunakan pada sistem IEEE 9 bus adalah 30 MW untuk unit 1, 40 MW untuk unit 2 dan 35 MW untuk unit 3 dengan hasil validasi yang dapat dilihat pada **tabel 4.6**, **tabel 4.7** dan **tabel 4.8**.

Tabel 4. 5 Profil beban simulasi validasi tahap 2

Jam ke-	1	2	3	4	5
Total Beban (MW)	365	401.5	478.15	511	438

Tabel 4. 6 Biaya total pembangkitan validasi tahap 2

Ramprate	Total Biaya Pembangkitan (\$)
Tidak Aktif	45203
Aktif	45222

Tabel 4. 7 Pembangkitan tanpa batasan *ramp rate* validasi tahap 2

Pembangkit	Daya pembangkitan pada jam ke- (MW)				
	1	2	3	4	5
Unit 1	106.30	118.56	150.49	172.23	130.90
Unit 2	154.62	169.43	194.79	197.94	184.25
Unit 3	108.31	118.66	140.08	148.79	129.03

Tabel 4. 8 Pembangkitan dengan batasan *ramp rate* validasi tahap 2

Pembangkit	Daya pembangkitan pada jam ke- (MW)				
	1	2	3	4	5
Unit 1	106.30	120.25	150.25	170.72	140.72
Unit 2	154.62	168.40	194.40	195.87	178.25
Unit 3	108.31	117.94	140.70	152.45	124.85

Tabel 4. 9 Perubahan daya pembangkitan validasi tahap 2

Pembangkit	<i>Ramp rate</i> (MW/jam)	Perubahan Daya (MW)			
		1-2	2-3	3-4	4-5
Unit 1	30	12.26	31.93	21.74	-41.33
Unit 2	40	14.81	25.36	3.15	-13.69
Unit 3	35	10.35	21.42	8.71	-19.76

Tabel 4. 10 Perubahan daya pembangkitan validasi tahap 2

Pembangkit	<i>Ramp rate</i> (MW/jam)	Perubahan Daya (MW)			
		1-2	2-3	3-4	4-5
Unit 1	30	13.95	30	20.47	-30
Unit 2	40	13.78	26	1.47	-17.62
Unit 3	35	9.63	22.76	11.75	-27.6

4.1.2.2 Simulasi Validasi Tahap 2

Berdasarkan **tabel 4.6**, didapat bahwa harga total pembangkitan tanpa mempertimbangkan batasan *ramp rate* lebih murah, namun pada unit 1 terjadi pelanggaran batasan *ramp rate* pada perubahan daya antara jam 2 ke 3 dan jam 4 ke 5 sesuai **tabel 4.9**. Pelanggaran ini bisa terjadi dikarenakan perubahan daya yang drastis bila dilihat pada **tabel 4.5**.

Penggunaan *ramp rate* memang menyebabkan harga total pembangkitan menjadi lebih mahal, namun unit pembangkit menjadi lebih aman dalam operasinya karena tidak melanggar batasan tersebut. Dapat dilihat pada **tabel 4.10** bahwa perubahan daya pada unit 1 tidak ada yang melebihi 30 MW ataupun kurang dari -30 MW.

4.1.3 Validasi Tahap 3

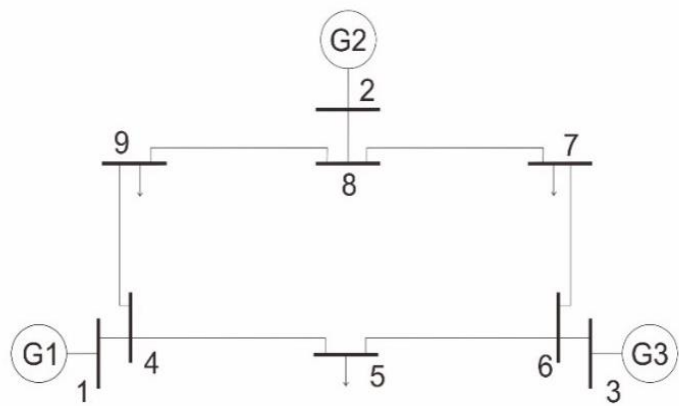
Sistem IEEE 9 bus terdiri dari tiga pembangkit, tiga *load bus* dan sembilan saluran seperti pada **gambar 4.1**. Validasi tahap ini dilakukan dengan menerapkan analisis kontingensi pada setiap saluran sistem IEEE 9 bus. Berdasarkan hasil analisis kontingensi tersebut, akan didapat daftar urutan dari saluran yang memiliki dampak dari yang terbesar hingga yang terkecil. Besarnya dampak dapat diketahui melalui nilai total harga pembangkitan, semakin besar total harga pembangkitan, maka saluran tersebut memiliki peran yang paling penting dalam sistem.

Validasi dilanjutkan dengan menerapkan kontingensi dengan dampak terbesar ke dalam simulasi validasi tahap 2. Validasi tahap 3 sendiri bertujuan untuk mengetahui kondisi batasan *ramp rate* saat terjadi

kontingensi serta menganalisis total biaya pembangkitan antara kondisi normal dan kontingensi.

4.1.3.1 Analisis Kontingensi Sistem IEEE 9 Bus

Berdasarkan tabel 4.11 terlihat bahwa saluran nomor 8 yaitu saluran dari bus 8 ke bus 9 adalah saluran dengan dampak terbesar bila terjadi kontingensi, ditunjukkan dengan total biaya pembangkitan paling besar yaitu 7129,6 \$. Hasil biaya pembangkitan dalam tabel 4.11 merupakan hasil simulasi program sesuai dengan sistem IEEE 9 bus yang telah dimodifikasi dengan total beban 365 MW sesuai dengan tabel 4.3.



Gambar 4. 1 *Single line diagram* sistem IEEE 9 bus

Tabel 4. 11 Daftar dampak kontingensi Sistem IEEE 9 Bus

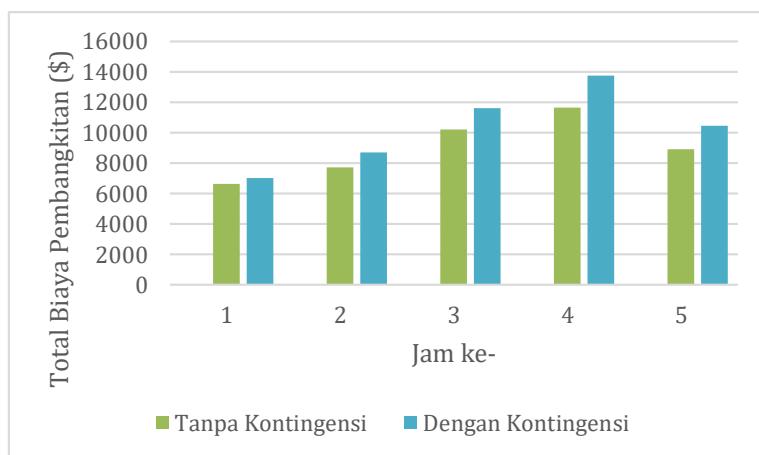
Urutan	Saluran No.	From Bus	To Bus	Biaya (\$)
1	8	8	9	7129.60
2	1	1	4	6750.70
3	7	8	2	6750.70
4	2	4	5	6622.80
5	3	5	6	6622.80
6	4	3	6	6622.80
7	5	6	7	6622.80
8	6	7	8	6622.80
9	9	9	4	6622.80

4.1.3.2 Simulasi Validasi Tahap 3

Hasil simulasi dengan menggunakan analisis kontingensi dan profil beban pada **tabel 4.12** mendapatkan hasil sesuai pada **gambar 4.2**, **tabel 4.13**, **tabel 4.14**, **tabel 4.15**, **tabel 4.16**, **tabel 4.17** dan **tabel 4.18**.

Tabel 4. 12 Profil beban simulasi validasi tahap 3

Jam ke-	1	2	3	4	5
Total Beban (MW)	365	401.5	474.5	511	438



Gambar 4. 2 Biaya pembangkitan tiap jam pada kondisi normal

Tabel 4. 13 Biaya total pembangkitan validasi tahap 3

Kondisi	Total Biaya Pembangkitan (\$)
Normal tanpa kontingensi	45084.35
Normal dengan kontingensi	51507.09
Kontingensi	52173.54

Tabel 4. 14 Daya pembangkitan kondisi normal validasi tahap 3

Pembangkit	Daya pembangkitan pada jam ke- (MW)				
	1	2	3	4	5
Unit 1	154.43	184.43	214.43	228.94	198.94
Unit 2	115.62	95.52	105.44	93.92	83.65
Unit 3	98.15	125.48	160.48	195.48	160.48

Tabel 4. 15 Daya pembangkitan kondisi kontingensi validasi tahap 3

Pembangkit	Daya pembangkitan pada jam ke- (MW)				
	1	2	3	4	5
Unit 1	156.93	185.21	216.93	231.44	199.71
Unit 2	112.65	95.99	102.71	90.59	84.25
Unit 3	101.07	126.03	163.4	198.4	161.03

Tabel 4. 16 Perbandingan daya pembangkitan validasi tahap 3

Pembangkit	Daya pembangkitan pada jam ke- (MW)					Kondisi
	1	2	3	4	5	
Unit 1	154.43	184.43	214.43	228.94	198.94	Normal
	156.93	185.21	216.93	231.44	199.71	Kontingensi
Unit 2	115.62	95.52	105.44	93.92	83.65	Normal
	112.65	95.99	102.71	90.59	84.25	Kontingensi
Unit 3	98.15	125.48	160.48	195.48	160.48	Normal
	101.07	126.03	163.4	198.4	161.03	Kontingensi

Tabel 4. 17 Perubahan daya pembangkitan validasi tahap 3

Pembangkit	Ramp rate (MW/5 menit)	Perubahan daya kondisi normal ke kondisi kontingensi (MW)				
		1	2	3	4	5
Unit 1	2.50	2.50	0.78	2.50	2.50	0.77
Unit 2	3.33	-2.97	0.47	-2.73	-3.33	0.60
Unit 3	2.92	2.92	0.55	2.92	2.92	0.55

Tabel 4. 18 Aliran daya kondisi normal jam ke-4 validasi tahap 3

From Bus	To Bus	From Bus Injection			Kapasitas Saluran (MVA)
		P (MW)	Q (MVar)	S (MVA)	
1	4	228.94	60.49	236.8	250
4	5	74.7	2.34	74.7	250
5	6	-66.14	-26.28	71.2	150
3	6	195.48	18.93	196.4	300
6	7	127.79	8.62	128.1	150
7	8	-41.88	-30.05	51.5	250
8	2	-93.92	-22.07	96.5	250
8	9	51.88	7.9	52.5	250
9	4	-152.03	-32.27	155.4	250

Tabel 4. 19 Aliran daya kondisi kontingensi jam ke-4 validasi tahap 3

From Bus	To Bus	From Bus Injection			Kapasitas Saluran (MVA)
		P (MW)	Q (MVA _r)	S (MVA)	
1	4	231.44	94.54	250.0	250
4	5	73.61	-4.21	73.7	250
5	6	-67.3	-35.48	76.1	150
3	6	198.4	98.42	221.5	300
6	7	129.16	68.16	146.0	150
7	8	-41.31	19.6	45.7	250
8	2	-90.59	41.16	99.5	250
8	9	49.06	-9.65	50.0	125
9	4	-154.79	-56.73	164.9	250

4.1.3.3 Analisis Validasi Tahap 3

Hasil simulasi pada **tabel 4.13** menunjukkan bahwa total biaya pembangkitan pada kondisi kontingensi lebih mahal dibandingkan kondisi normal. Hal ini dikarenakan pada saat kontingensi, sistem tidak mempertimbangkan aspek ekonomi, semua diprioritaskan untuk keamanan sistem. Selain harga yang lebih mahal, kondisi kontingensi juga mempengaruhi kondisi normal, dapat dilihat pada **tabel 4.13** dan **gambar 4.2** bahwa harga pembangkitan kondisi normal dengan adanya kontingensi menjadi lebih mahal bila dibanding tanpa adanya kontingensi, hal ini dikarenakan pada kondisi normal harus dilakukan *re-dispatch* untuk menyesuaikan pembangkitan pada masing-masing unit agar tidak melanggar batas *ramp rate*.

Sesuai dengan program *AC-SCOPF*, pada **tabel 4.17** dapat terlihat bahwa tidak terjadi pelanggaran batas *ramp rate* dalam perubahan daya antara kondisi normal ke kondisi kontingensi. Pada **tabel 4.18** dan **tabel 4.19** juga terlihat bahwa aliran daya pada kondisi normal dan kontingensi pada saluran tidak melebihi kapasitas saluran tersebut. Walaupun kapasitas saluran dari bus 8 ke bus 9 menurun dari 250 MVA menjadi 125 MVA akibat kontingensi, aliran daya pada saluran tersebut justru menurun sehingga sistem tetap aman. Dari hasil validasi tahap ini dapat disimpulkan bahwa program yang dibuat mampu untuk melakukan perhitungan *AC-SCOPF*.

4.2 Pengujian AC-SCOPF Kalimantan Selatan dan Tengah

Simulasi *AC-SCOPF* pada sistem kelistrikan Barito dilakukan dengan menggunakan data yang dijabarkan pada **tabel 3.1**, **tabel 3.2**, **tabel 3.3** dan **tabel 3.4**. Kondisi beban yang digunakan pada **tabel 3.3** adalah beban tinggi dari sistem Barito yang diasumsikan sebagai kondisi normal dalam simulasi. Simulasi ini terbagi mejadi dua tahap, tahap pertama adalah analisis kontingensi untuk mengetahui kontingensi dengan dampak terbesar pada sistem dan tahap kedua adalah pengaplikasian *AC-SCOPF* pada sistem Barito.

4.2.1 Analisis Kontingensi Kalimantan Selatan dan Tengah

Analisis kontingensi dilakukan pada saluran *double circuit*, untuk melihat pemenuhan batas kapasitas saluran ketika salah satu saluran putus. Berdasarkan tabel **4.20** terlihat bahwa dampak terbesar didapat ketika terjadi kontingensi pada saluran nomor 7 yaitu saluran dari GI Kasongan ke GI Kuala Kurun (bus 6 ke bus 12), ditunjukkan dengan total biaya pembangkitan paling besar yaitu 43885,17 \$ atau setara dengan Rp 620.360.763. Hal ini dapat terjadi karena suplai daya dari Sampit dan Pulang Pisau berkurang akibat adanya kontingensi pada salah satu saluran Kasongan – Kuala Kurun. Pada akhirnya suplai daya pada daerah Bangkanai meningkat, dengan harga PLTMG yang lebih mahal dibandingkan dengan PLTU dan PLTA, maka total biaya pembangkitan menjadi bertambah besar. Hasil biaya pembangkitan dalam **tabel 4.20** merupakan hasil simulasi program pada sistem Barito dengan total beban 617,55 MW sesuai dengan **tabel 3.3**.

4.2.2 Simulasi AC-SCOPF Kalimantan Selatan dan Tengah

Simulasi dilakukan dengan memodelkan dua kondisi, kondisi normal dan kondisi kontingensi yang terjadi pada saluran Kasongan-Kuala Kurun dengan menggunakan data *ramp rate* yang pada **tabel 3.2**. Dari hasil simulasi yang dilakukan, didapat hasil simulasi yang dijabarkan pada **tabel 4.21**, **tabel 4.22**, **tabel 4.23**, dan **tabel 4.24**.

Tabel 4. 20 Daftar dampak kontingensi Sistem Barito

No.	No. Urut Saluran	From Bus	To Bus	Total Biaya Pembangkitan (\$)
1	7	6	12	43885.1638
2	31	32	34	43885.1608
3	2	2	3	43885.1604
4	37	28	29	43885.1604
5	30	29	32	43885.1603
6	9	13	14	43885.1602
7	29	31	32	43885.1601
8	32	29	30	43885.1592
9	33	30	33	43885.1592
10	27	24	29	43885.1592
11	36	22	28	43885.1592
12	35	33	34	43885.1591
13	38	34	10	43885.1591
14	12	16	17	43885.1589
15	8	12	13	43885.1589
16	34	19	33	43885.1588
17	26	26	27	43885.1588
18	3	3	4	43885.1588
19	1	1	2	43885.1588
20	28	22	31	43885.1588
21	11	14	16	43885.1572
22	10	14	15	43885.1365

Tabel 4. 21 Biaya total pembangkitan Barito

Kondisi	Total Biaya Pembangkitan (\$)
Normal Tanpa Kontingensi	43885.1588
Normal	43885.1641
Kontingensi	49073.7607

Tabel 4. 22 Perubahan daya pembangkitan Barito

Pembangkit	Kondisi		Perubahan Daya (MW)	<i>Ramp rate</i> (MW/5menit)
	Normal (MW)	Kotingensi (MW)		
Unit 1	25	22.41	-2.59	5
Unit 2	130	120.28	-9.72	15
Unit 3	110.78	99.94	-10.84	560
Unit 4	10	77.94	67.94	560
Unit 5	90	62.01	-27.99	750
Unit 6	260	248.2	-11.8	20

Tabel 4. 23 Aliran daya saluran kondisi normal Barito

From Bus	To Bus	From Bus Injection			Kapasitas Saluran (MVA)
		P (MW)	Q (MVA _r)	S (MVA)	
1	2	-28.4	-17.6	33.4	550
2	3	-17.14	17.98	24.8	278
3	4	0.01	-16.67	16.7	550
2	5	-18.05	-7.87	19.7	275
2	6	-22.27	-10.45	24.6	275
5	6	-24.13	-8.58	25.6	275
6	12	-43.24	-21.72	48.4	550
12	13	-47.2	0.88	47.2	550
13	14	-52.26	18.31	55.4	550
14	15	-119.76	40.78	126.5	550
14	16	57.36	-19.11	60.5	550
16	17	45.9	-3.81	46.1	550
17	18	10.4	3.64	11.0	275
18	19	-3.1	1.3	3.4	275
17	19	9.95	3.36	10.5	275
19	20	24.98	12.99	28.2	139
19	21	-2.16	1.84	2.8	139
21	22	-28.73	-11.28	30.9	139
19	22	-17.35	-7.54	18.9	139
22	23	-11.09	7.75	13.5	169
23	24	-38.59	-6.87	39.2	169
22	24	-28.89	-3.14	29.1	169

Tabel 4. 23 Aliran daya saluran kondisi normal Barito (lanjutan)

From Bus	To Bus	From Bus Injection			Kapasitas Saluran (MVA)
		P (MW)	Q (MVA _r)	S (MVA)	
24	25	24.38	4.84	24.9	139
25	26	9.46	0.87	9.5	139
24	26	18.56	1.02	18.6	139
26	27	0	-2.74	2.7	278
24	29	136.59	6.96	136.8	550
22	31	14.83	11.85	19.0	550
31	32	-11.11	2.59	11.4	278
29	32	45.98	10.74	47.2	550
32	34	21.43	8.39	23.0	278
29	30	39.03	8.81	40.0	550
30	33	25.17	3.33	25.4	550
19	33	-37.33	-20.18	42.4	550
33	34	-29.87	-0.07	29.9	278
22	28	5.61	37.65	38.1	550
28	29	-14.89	26.2	30.1	550
34	10	-21.72	2.43	21.9	278
10	9	15.86	-1.61	15.9	139
9	7	6.81	-4.44	8.1	139
10	11	-61.72	-4.72	61.9	139
11	7	33.73	-2.62	33.8	139
11	8	33.96	-2.46	34.0	139
8	7	11.84	-10.39	15.8	139
6	7	-19.62	9.71	21.9	550

Tabel 4. 24 Aliran daya saluran kondisi kontingensi Barito

From Bus	To Bus	From Bus Injection			Kapasitas Saluran (MVA)
		P (MW)	Q (MVA _r)	S (MVA)	
1	2	-28.4	-17.6	33.4	550
2	3	-14.58	-15.68	21.4	278
3	4	0.01	-14.96	15.0	550
2	5	-19.34	6.64	20.4	275
2	6	-23.57	4.04	23.9	275

Tabel 4. 24 Aliran daya saluran kondisi kontingensi Barito (lanjutan)

From Bus	To Bus	From Bus Injection			Kapasitas Saluran (MVA)
		P (MW)	Q (MVA _r)	S (MVA)	
5	6	-25.42	5.49	26.0	275
6	12	-66.88	6.17	67.2	275
12	13	-71.38	22.33	74.8	550
13	14	-77.02	33.5	84.0	550
14	15	-175.32	57.27	184.4	550
14	16	87.84	-23.68	91.0	550
16	17	75.54	-16.45	77.3	550
17	18	24.83	-6.83	25.8	275
18	19	11.25	-10.61	15.5	275
17	19	24.39	-7.12	25.4	275
19	20	25.01	13.6	28.5	139
19	21	4.55	-4.51	6.4	139
21	22	-22.03	-18.2	28.6	139
19	22	-10.54	-13.95	17.5	139
22	23	-9.8	6.3	11.7	169
23	24	-37.3	-8.67	38.3	169
22	24	-27.6	-4.58	28.0	169
24	25	24.44	6.63	25.3	139
25	26	9.47	1.66	9.6	139
24	26	18.61	2.77	18.8	139
26	27	0	-2.33	2.3	278
24	29	127.21	19.56	128.7	550
22	31	9.89	16.56	19.3	550
31	32	-16.06	6.26	17.2	278
29	32	35.34	19.98	40.6	550
32	34	5.84	20.77	21.6	278
29	30	28.14	18.5	33.7	550
30	33	14.28	12.56	19.0	550
19	33	-22.19	-31.92	38.9	550
33	34	-25.57	-6.92	26.5	278
22	28	-6.48	46.46	46.9	550
28	29	-26.99	34.78	44.0	550
34	10	-33.02	7.6	33.9	278

Tabel 4. 24 Aliran daya saluran kondisi kontingensi Barito (lanjutan)

From Bus	To Bus	From Bus Injection			Kapasitas Saluran (MVA)
		P (MW)	Q (MVA _r)	S (MVA)	
10	9	9.17	0.74	9.2	139
9	7	0.15	-2.44	2.4	139
10	11	-66.42	-3.16	66.5	139
11	7	26.42	-0.33	26.4	139
11	8	26.65	-0.17	26.7	139
8	7	4.67	-8.73	9.9	139
6	7	1.34	7.53	7.6	550

4.2.3 Analisis AC-SCOPF pada Sistem Barito

Berdasarkan hasil simulasi pada **tabel 4.20**, pada kondisi normal tanpa adanya kontingensi, total harga pembangkitan dari sistem Barito adalah sebesar 43885.1588 \$ atau setara Rp 620.360.562, dengan total beban sebesar 617,55 MW, maka harga pembangkitan untuk sistem Barito adalah 1.005 Rp/kWh. Total harga pembangkitan pada kondisi normal dengan mempertimbangkan kontingensi tidak terlalu berbeda dengan kondisi normal tanpa mempertimbangkan kontingensi, hal tersebut menunjukkan sistem tidak memerlukan *re-dispatch* agar sistem tidak melanggar batas ketika kontingensi.

Pada saat terjadi kontingensi saluran Kasongan-Kuala Kurun, total harga pembangkitan menjadi naik hingga 11,8%, namun sistem tetap aman dengan tidak adanya pelanggaran pada *ramp rate* dan kapasitas saluran sesuai dengan **tabel 4.22** dan **tabel 4.24**. Perubahan daya pada kondisi normal ke kontingensi masih cukup jauh dari batas *ramp rate*, begitu juga aliran daya pada masing-masing saluran masih berada jauh di batas kapasitas saluran, maka untuk mendapatkan hasil analisis yang lebih maksimal dan membuktikan SCOPF mampu diterapkan pada Barito, dibutuhkan simulasi dengan menggunakan beban yang lebih besar. Simulasi kemudian dilanjutkan menggunakan Beban Kalimantan Selatan dan Tengah tahun 2028 yaitu sebesar 1605,63 MW dengan kapasitas pembangkitan yang telah disesuaikan.

Tabel 4. 25 Biaya total pembangkitan Barito tahap 2

Kondisi	Total Biaya Pembangkitan (\$)
Normal Tanpa Kontingensi	115159.0645
Normal	115159.0658
Kontingensi	116538.2674

Tabel 4. 26 Perubahan daya pembangkitan Barito tahap 2

Pembangkit	Kondisi		Perubahan Daya (MW)	Ramp rate (MW/5menit)
	Normal (MW)	Kotingensi (MW)		
Unit 1	288.05	284.60	-3.45	5
Unit 2	222.01	207.45	-14.56	15
Unit 3	10.00	76.497	-30.74	560
Unit 4	430.00	70.59	60.59	560
Unit 5	600.00	425.26	-4.74	750
Unit 6	110.78	592.34	-7.66	20

Tabel 4. 27 Aliran daya saluran kondisi normal Barito tahap 2

From Bus	To Bus	From Bus Injection			Kapasitas Saluran (MVA)
		P (MW)	Q (MVA _r)	S (MVA)	
1	2	-73.84	-45.77	86.87484	550
2	3	-260.07	-56.24	266.0815	278
3	4	0.01	-17.52	17.52	550
2	5	60.25	-1.78	60.27629	275
2	6	49.26	-8.87	50.05222	275
5	6	44.23	-9.81	45.30485	275
6	12	16.97	-45.88	48.91784	550
12	13	7.17	-28.88	29.75674	550
13	14	-5.31	-16.66	17.48576	550
14	15	-116.07	-75.91	138.6888	550
14	16	84.88	52.96	100.0469	550
16	17	54.65	50.32	74.28812	550
17	18	-5.48	14.11	15.13679	275
18	19	-40.56	-3.03	40.67302	275
17	19	-6.67	13.39	14.95931	275
19	20	66.1	42.84	78.76849	139

Tabel 4. 27 Aliran daya saluran kondisi normal Barito tahap 2 (lanjutan)

From Bus	To Bus	From Bus Injection			Kapasitas Saluran (MVA)
		P (MW)	Q (MVA _r)	S (MVA)	
19	21	-23.75	-1.24	23.78235	139
21	22	-92.99	-41.93	102.0062	139
19	22	-63.33	-24.62	67.94728	139
22	23	-12.94	1.96	13.0876	169
23	24	-84.41	-40.13	93.46371	169
22	24	-59.13	-26.21	64.6786	169
24	25	65.11	36.43	74.60869	139
25	26	24.83	11.71	27.45274	139
24	26	49.61	25.32	55.69789	139
26	27	0	-2.4	2.4	278
24	29	306.03	151.94	341.6725	550
22	31	67.18	36.28	76.35045	550
31	32	-0.5	-0.4	0.640312	278
29	32	135.77	56.03	146.877	550
32	34	100.17	36.17	106.5002	278
29	30	124.7	61.85	139.196	550
30	33	88.34	40.75	97.28575	550
19	33	-126.91	-64.12	142.1883	550
33	34	-87.91	-44.17	98.38271	278
22	28	107.84	76.2	132.0451	550
28	29	54.42	43.75	69.82549	550
34	10	-22.66	-28.65	36.52805	278
10	9	26.79	8.73	28.17653	139
9	7	3.22	-3.69	4.897397	139
10	11	-112.22	-70.92	132.7516	139
11	7	53.13	27.14	59.66051	139
11	8	53.74	27.58	60.40401	139
8	7	-4.15	-5.95	7.254309	139
6	7	33.32	13.36	35.89864	550

Tabel 4. 28 Aliran daya saluran kondisi kontingensi Barito tahap 2

From Bus	To Bus	From Bus Injection			Kapasitas Saluran (MVA)
		P (MW)	Q (MVar)	S (MVA)	
1	2	-73.84	-45.77	86.87	550
2	3	-256.73	-48.25	261.22	278
3	4	0.01	-17.10	17.10	550
2	5	58.55	-6.22	58.88	275
2	6	47.58	-13.31	49.41	275
5	6	42.54	-14.28	44.87	275
6	12	1.63	-44.04	44.07	275
12	13	-8.11	-26.96	28.15	550
13	14	-20.58	-14.83	25.37	550
14	15	-145.47	-71.26	161.99	550
14	16	98.98	50.00	110.89	550
16	17	68.44	45.93	82.42	550
17	18	1.30	11.43	11.50	275
18	19	-33.76	-5.63	34.23	275
17	19	0.12	10.70	10.70	275
19	20	66.10	42.83	78.76	139
19	21	-20.72	-2.41	20.86	139
21	22	-89.93	-42.97	99.67	139
19	22	-60.23	-25.90	65.56	139
22	23	-11.85	1.92	12.00	169
23	24	-83.32	-40.15	92.49	169
22	24	-58.03	-26.28	63.70	169
24	25	65.11	36.45	74.62	139
25	26	24.83	11.72	27.46	139
24	26	49.61	25.33	55.70	139
26	27	0.00	-2.40	2.40	278
24	29	300.65	150.83	336.36	550
22	31	66.85	35.62	75.75	550
31	32	-0.82	-1.04	1.32	278
29	32	133.86	54.80	144.64	550
32	34	97.95	34.33	103.79	278
29	30	121.43	61.33	136.04	550
30	33	85.09	40.30	94.15	550

Tabel 4. 28 Aliran daya saluran kondisi kontingensi Barito tahap 2 (lanjutan)

From Bus	To Bus	From Bus Injection			Kapasitas Saluran (MVA)
		P (MW)	Q (MVA _r)	S (MVA)	
19	33	-119.42	-66.84	136.85	550
33	34	-83.35	-45.97	95.19	278
22	28	107.81	74.53	131.06	550
28	29	54.40	42.09	68.78	550
34	10	-20.31	-32.22	38.09	278
10	9	24.46	10.63	26.67	139
9	7	0.91	-1.73	1.95	139
10	11	-107.55	-76.41	131.93	139
11	7	48.20	31.42	57.54	139
11	8	48.82	31.86	58.30	139
8	7	-8.96	-1.32	9.06	139
6	7	45.32	2.48	45.39	550

Berdasarkan hasil simulasi dengan profil beban Barito tahun 2028, total harga pembangkitan pada kondisi normal dengan dan tanpa mempertimbangkan *ramp rate* masih memiliki harga yang tidak jauh berbeda, menunjukkan bahwa tidak diperlukan *re-dispatch* pada unit pembangkit ketika terjadi kontingensi. Namun, pada **tabel 4.26** dapat terlihat bahwa program *SCOPF* mampu bekerja pada sistem Kalimantan Selatan dan Tengah dengan tidak adanya pelanggaran *ramp rate*. Perubahan daya pada kondisi normal ke kontingensi tidak melebihi batasan yang ditentukan, salah satunya adalah pembangkit unit 2 dengan perubahan daya sebesar 14,56 dari *ramp rate* sebesar 15 MW/5 menit. Perubahan daya yang besar dapat diatasi oleh PLTMG Bangkanai yang memiliki *ramp rate* yang tinggi, selama kualitas tegangan dari sistem terjaga dengan jumlah losses yang tidak terlalu besar. Kemudian, bila dilihat pada **tabel 4.27** dan **tabel 4.28** pembebanan saluran paling besar terjadi pada saluran Sampit menuju PLTU Sampit dengan angka mencapai 95,71%, namun secara keseluruhan pembebanan saluran rata-rata hanya mencapai angka 26% dan masih dalam batas yang ditentukan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil simulasi, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Total harga pembangkitan pada kondisi normal dengan dan tanpa mempertimbangkan kontingensi pada saluran Kasongan-Kuala Kurun memiliki harga yang tidak jauh berbeda, yaitu sekitar Rp 620.360.562, hal ini dapat dikarenakan sistem Barito memiliki kapasitas saluran yang besar, dengan beban yang cukup kecil. Sehingga tidak diperlukan adanya *re-dispatch* pada kondisi normal agar tidak terjadi pelanggaran batasan ketika terjadi kontingensi.
2. Pada kondisi normal, unit PLTA dan PLTU bekerja pada daya maksimal, sedangkan PLTMG pada daerah Bangkanai dengan *ramp rate* yang tinggi bekerja sebagai pembangkit *peaker* yang dapat mengatasi perubahan daya yang besar, khususnya ketika terjadi kontingensi selama kualitas tegangan dapat terjaga dan jumlah *losses* tidak terlalu besar.
3. Dengan menggunakan profil beban Barito pada tahun 2028, *Sequential Quadratic Programming* untuk perhitungan *AC-SCOPF* terbukti dapat diterapkan pada sistem Kalimantan Selatan dan Tengah dengan tidak adanya pelanggaran *ramp rate* yaitu terbesar 14,56 dari 15 MW/5 menit, serta tidak adanya pelanggaran pada batas kapasitas saluran dengan angka tertinggi yaitu 95,71% pada saluran Sampit ke PLTU Sampit.

5.2 Saran

Untuk pengembangan penelitian, berikut adalah saran dari penulis terkait penelitian ini:

1. Penelitian dapat dikembangkan dengan mempertimbangkan jaringan distribusi pada Barito, dan pengaruh konfigurasi *tower* sehingga didapat hasil analisis yang lebih mendekati kondisi lapangan.
2. Penelitian dapat dikembangkan dengan memodelkan kontingensi pada saluran *single circuit* agar dapat diterapkan di sistem manapun dengan hasil yang mendekati kondisi lapangan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

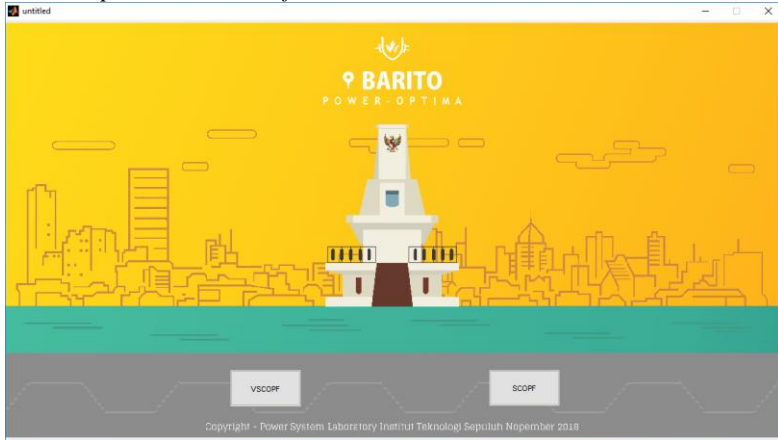
DAFTAR PUSTAKA

- [1] Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, “Statistik Ketenagalistrikan 2015,” Jakarta, 2016.
- [2] Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral, “Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik PT Perusahaan Listrik Negara (Persero) Tahun 2017 s.d. 2026,” Jakarta, 2017.
- [3] Muljo Adji, *Gambaran Umum Pengelolaan Sistem Jawa Bali*. Jakarta: Ekspose Sekuriti Sistem Jawa Bali, 2005.
- [4] J. Condren, T. W. Gedra, and P. Damrongkulkamjorn, “Optimal Power Flow With Expected Security Costs,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 2, pp. 541–547, May 2006.
- [5] R. S. Wibowo, R. Maulana, A. Taradini, F. A. Pamuji, A. Soeprijanto, and O. Penangsang, “Quadratic programming approach for security constrained optimal power flow,” 2015, pp. 200–203.
- [6] Allen J. Wood and B. F. W., *Power Generation Operation and Control*. America, 1996.
- [7] S. Sivasubramani and K. S. Swarup, “Sequential quadratic programming based differential evolution algorithm for optimal power flow problem,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 5, no. 11, p. 1149, 2011.
- [8] H. Xu, Y. Tang, and Q.-L. Wan, “Implementation of AC Optimal Power Flow Based Financial Transmission Right Auction under Static Security Constraints,” 2009, pp. 1–4.
- [9] H. Saadat, *Power System Analysis 2nd Edition*. 1999.
- [10] O. Penangsang, *Analisa Aliran Daya*. ITS Press Surabaya, 2012.
- [11] R. S. Wibowo, T. P. Fathurroddli, O. Penangsang, and A. Soeprijanto, “Security constrained optimal power flow incorporating preventive and corrective control,” 2014, pp. 29–34.
- [12] Nursidi, *Dynamic Optimal Power Flow Arus Searah Menggunakan Quadratic Programming*. 2013.
- [13] “Active Power Ramp Rates,” University of Wisconsin, Madison, Jun. 2013.
- [14] “WÄRTSILÄ Flexible Power Generation. Northwest Power dan Conservation Council,” Feb. 2014.

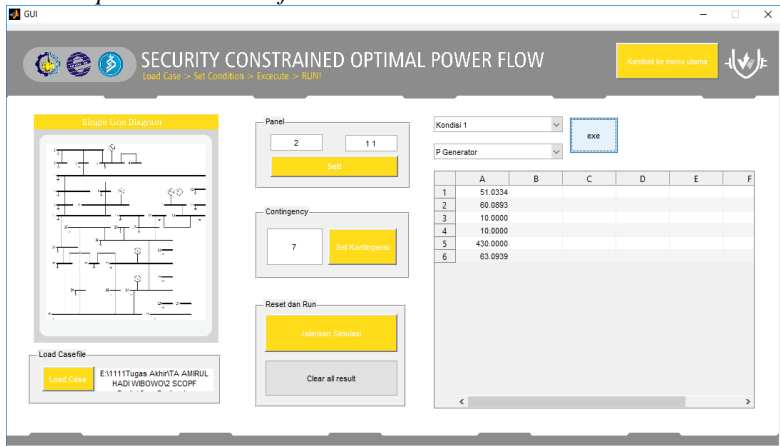
Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

1. Graphical User Interface Utama



2. Graphical User Interface SCOPF



Halaman ini sengaja dikosongkan

RIWAYAT HIDUP PENULIS



Aden Riangga lahir di Sidoarjo pada tanggal 17 Februari 1996. Penulis menyelesaikan Pendidikan formal di SDN Pucang II Sidoarjo pada tahun 2008, SMPN 1 Sidoarjo pada tahun 2011 dan SMAN 1 Sidoarjo pada tahun 2014. Kemudian melanjutkan studi S1 Teknik Elektro di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) pada tahun 2014. Bidang studi yang diambil penulis adalah Teknik Sistem Tenaga. Dalam bidang organisasi, penulis tergabung dalam beberapa organisasi, salah satunya adalah Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro ITS pada tahun 2016 – 2017 sebagai Kepala Departemen Komunikasi dan Informasi Selain itu, penulis aktif sebagai asisten di Laboratorium Simulasi Sistem Tenaga Listrik Teknik Elektro ITS. Penulis dapat dihubungi melalui alamat email: rianggaaden@gmail.com